

부분요인배치법을 이용한 비에스테르화 바이오 디젤유의 성능 최적화를 위한 인자 선정

정석호¹ · 고대권[†]

(Received September 30, 2014 ; Revised November 17, 2014 ; Accepted January 6, 2015)

Selection of Factors for Performance Optimization on Non-esterified Bio-diesel Fuel Using Fractional Factorial Design

Sukho Jung¹ · Daekwon Koh[†]

요약: 비에스테르화 바이오 디젤유는 에스테르화 공정을 거치지 않기 때문에 공정에 드는 비용이 절감되며 경유에 5%로 혼합하여 전자제어 분사식 디젤엔진에 사용할 경우 에스테르화 바이오 디젤유보다 경유에 더 유사한 성능을 나타내었다. 이러한 연구를 바탕으로 경유에 5% 혼합된 비에스테르화 바이오 디젤유를 전자제어 분사식 디젤엔진에 적용하기 위해서는 성능 최적화가 필요하다. 본 연구에서는 비에스테르화 바이오 디젤유의 성능 최적화를 위한 기초 실험으로 연료소비율, 질소산화물 및 도시평균유효압력을 반응치로 정하고 제어 가능한 6가지 인자에 대해서 그 영향력을 평가하고자 부분요인배치법을 이용하여 25%와 50%의 부분 부하에서 실험을 수행하였다. 그 결과 6가지 인자 중 분사시기 및 커먼 레일압력이 가장 큰 영향을 미쳤고 각 부하에서 영향의 크기는 다르게 나타났다.

주제어: 부분요인배치법, 비에스테르화, 바이오 디젤유, 성능 최적화, 인자 선정

Abstract: Non-esterified bio-diesel fuel saves cost by no esterified process and its performance was more similar to diesel oil than esterified bio-diesel fuel when the fuel blended 95% diesel oil and 5% it was used on diesel engine with electronic control system. A performance optimization is necessary for application of non-esterified bio-diesel fuel blended with diesel oil 95% on the latest diesel engine. In this study, test using fractional factorial design was accomplished at 25% and 50% partial load in order to evaluate influence of controllable 6 factors on responses such as specific fuel consumption, nitrogen oxides and coefficient of variation of indicated mean effective pressure as basic experiment for performance optimization of this fuel. It is cleared that the injection timing and common rail pressure of 6 factors are mainly effective and its effect level is different according to load.

Keywords: Fractional factorial design, Non-esterified, Bio-diesel fuel, Performance optimization, Selection of factors

1. 서론

바이오 매스는 탄소의 증감이 0이 된다는 탄소 중립(Carbon neutral)의 이점을 가지고 있다. 그래서 탄소배출의 규제에 맞추어 탄소배출의 상당 부분을 차지하는 수송기계의 연료에 사용할 수 있는 바이오 연료에 대한 연구[1]-[3]가 활발하며 그 사용량 또한 증가되어 가고 있다. 특히, 디젤기관에 사용되는 경유의 대체 바이오 연료인 바이오 디젤유는 2009년 우리나라 전체 디젤유의 1.5%가 될 정도로 많이 사용되고 있고 장기적으로는 경유에 5% 혼합하여 사용할 계획을 세워 놓았다[4]. 그러나 현재의 바이오 디젤유

는 식물유 또는 폐식용유를 메탄올과 반응시켜 에스테르화하는 공정 때문에 경제적 단점을 지니고 있다. 이에 폐식용유를 단순히 정제시켜 경유와 혼합한 비에스테르화 바이오 디젤유를 사용하여 캠타입 디젤기관에 이용, 경제적 측면에서의 장점을 부각시킨 연구가 진행되었었다[5]-[7]. 그러나 현재의 디젤 엔진은 대부분 전자 제어 방식을 채택하여 사용조건에 최적화를 원하고 있기 때문에 전자제어 방식의 디젤엔진에서의 실험적 연구가 필요하다. 최적화를 위해서는 반응치에 대한 인자들의 효과를 체계적으로 살펴봐야 한다. 여기에 실험계획법은 최소의 데이터로 최대의 정보

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9214-2350>): Department of Mechanical Systems Engineering, Pukyong National University, 365, Sinsun-ro, Nam-gu, Busan, 608-739, Korea, E-mail: dkkoh@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6195

¹ Department of Mechanical Systems Engineering, Pukyong National University, E-mail: sukhojung@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6198

를 얻을 수 있기 때문에 제조공정에 많이 활용되고 있다. 물론 디젤엔진의 성능최적화에도 적용되고 있지만 실례는 국내외를 합하여 매우 드물게 연구되었다[8]-[12]. 최적화를 위해서는 최종적으로 반응표면분석법 또는 다구치법의 사용이 일반적이데 엔진과 같이 수많은 인자를 가지고 있는 경우에는 반응치에 효과가 큰 2-3개의 인자로 간추려낼 필요가 있다. 본 연구에서는 실시간 제어 가능한 6개의 인자 중에서 3개의 인자를 선정하기 위해 25%와 50%의 부분부하에서 부분요인배치법을 적용하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Figure 1에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 실험에 사용한 기관은 현대자동차(주) 제작의 D4EA이며 Table 1에 기관 사양에 대해서 상세하게 나타내었다. MOTOHAWK사의 MOTOTRON을 이용하여 컴퓨터와 ECU 및 인젝터 드라이버를 연결해서 연료분사시기(IT), 커먼레일압력(Pcr), 쓰로틀 포지션(TP), 다단분사(MPI), 가변용적 터보차저(VGT), 배기가스재순환(EGR)의 6 가지 인자를 실시간 제어할 수 있도록 구축하였다. 운전부하는 환웅(주) 제작의 와전류식 동력계 HE-130을 이용하여 조정하였다. 연소압력 측정은 Kistler사의 6052C를 각각 사용하였고, 720p/r의 로터리 엔코더를 이용하여 크랭크각 0.5° 간격으로 압력을 취득하였다. 배기가스분석기는 EUROTROTRON사의 GreenLine MK2를 이용하여 질소산화물(NOx)의 농도를 실시간 계측할 수 있도록 구축하였다. 또 전자저울을 이용하여 5분간의 연료소비량을 계측하였고 냉각수와 윤활유 등 각종 온도를 K type 열전대를 사용하여 계측하였다.

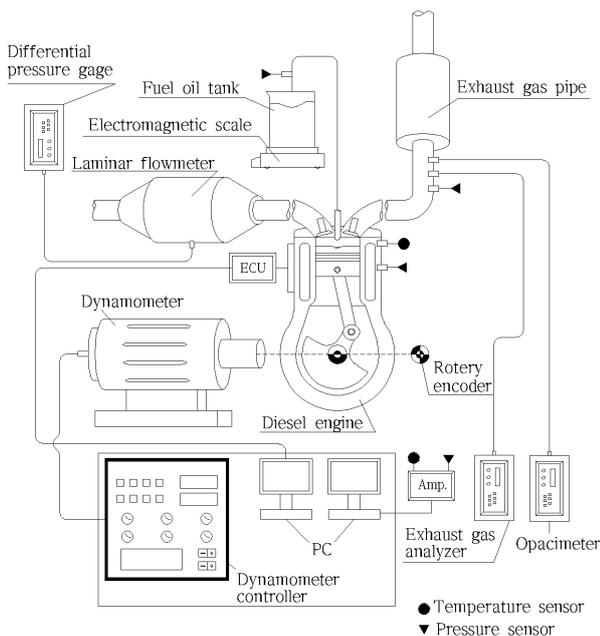


Figure 1: Schematic diagram of experimental equipment

Table 1: Specification of tested engine

Description	Specification
Model	HYUNDAI D4EA
Engine type	Water-cooled 4 stroke diesel engine
Number of cylinders	4
Piston displacement	1991 cc
Bore × Stroke	83mm × 92mm
Maximum power	84/4000 kW/rpm
Compression ratio	17.7

Table 2: Level of factors on tests

load (%)	25		50	
	1	2	1	50
level				
Injection timing (IT:°)	-6	-12	-7	-13
Common rail pressure (Pcr:MPa)	40	50	45	55
Throttle position (TP:%)	10	20	15	25
Multi-point injection (MPI:index)	0	2	0	2
Variable geometric turbocharger (VGT:%)	5	30	5	30
Exhaust gas recirculation (EGR:%)	5	30	5	30

2.2 실험방법

불명확한 현황을 파악하기 위한 실험을 설계함에 있어 요인배치법은 주효과와 교호작용의 효과를 모두 평가할 수 있는 장점이 있다. Table 2에 나타낸 것처럼 실시간 제어가 가능한 6인자 - 분사시기(IT), 커먼레일압력(Pcr), 쓰로틀 포지션(TP), 다단분사(MPI), 가변터보차저(VGT), 배기가스재순환(EGR) - 를 각 부하별로 2수준으로 구별하여 실험을 실시하였다. 반응치는 연료소비율(SFC), 도시평균유효압력 변동계수(COVimep), NOx로 선정하였다. 본 연구에서는 1/2 부분요인배치법을 적용하여 32번의 실험으로 각 인자들의 주효과와 교호작용에 대해서 살펴보았다. 자세한 각 인자의 수준을 Table 2에 나타내었고 신뢰성을 높이기 위해서 3회의 반복실험을 실시하였다. 본 연구에서는 고부하에서는 선택할 수 있는 인자의 수준 폭이 작고 엔진 메이커로부터 적절한 인자의 수준에 대한 자료를 얻지 못하였기 때문에 비교적 실험 부담이 작은 25%, 50% 부하에서 실험을 실행하였다. 본 연구 결과를 바탕으로 주로 엔진이 사용되는 75%와 100%와 같은 고부하에서 실험을 실시할 예정이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 신뢰수준

실험결과로부터 분산분석에 의해 주효과와 교호작용이 유의한지를 살펴보았다. 각 부하별 반응치에 대한 인자들의 유의확률(P value)은 소수점 3째자리까지 0을 나타내었다. 이는 3회 반복실험을 하였기 때문에 상당히 높은 신뢰를 주고 있다.

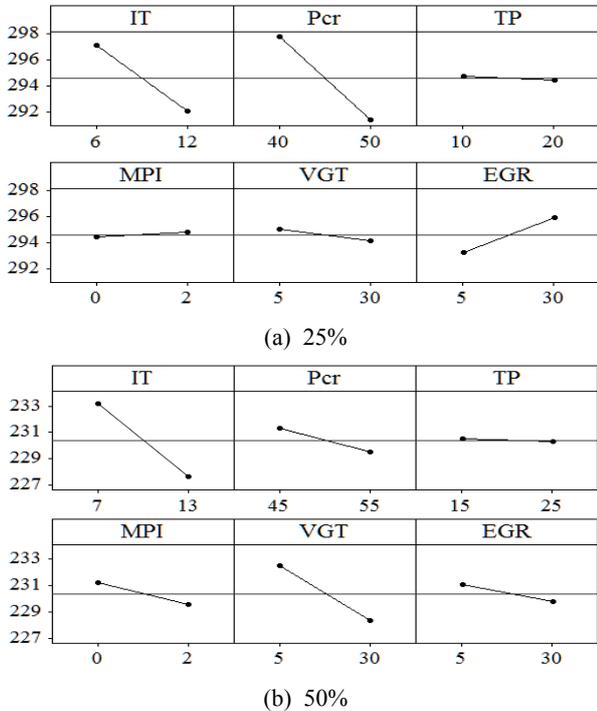


Figure 3: Main effect of each factors on SFC

3.2 주효과

Figure 3에 각 인자들의 SFC에 대한 주효과를 나타내었다. 부하에 관계없이 1수준에서 2수준으로 변할 때 약 4g/kWh가 변했다. 반면 Pcr의 경우 25% 부하에서는 약 4.5g/kWh 변하였으나 50%에서는 2g/kWh로 주효과 크기가 줄어들었다. 이는 부하가 커질수록 연소실 분위기 온도가 높아 고압분사의 효과가 작아지기 때문인 것으로 사료된다. MPI와 EGR의 경우는 25%와 50%의 효과가 반대로 나타났고 VGT의 경우는 50%에서 더 크게 나타났다.

Figure 4에 각 인자들의 COVimep에 대한 주효과를 나타내었다. IT와 MPI는 부하에 관계없이 수준이 커질수록 COVimep도 커졌다. Pcr과 TP의 경우, 25%에서는 수준이 커질수록 COVimep가 작아졌으나 50%에서는 반대가 되었다. 이는 부하의 증가에 따른 안정된 운전을 위해 요구되는 두 인자에 대한 설정이 타당하지 않았기 때문인 것으로 사료된다. VGT와 EGR은 25%에서는 COVimep를 감소시켰지만 50%에서는 별다른 영향을 주지 못했다.

Figure 5에 각 인자들의 NOx에 대한 주효과를 나타내었다. IT가 NOx에 미치는 영향은 부하가 증가할수록 약 200ppm에서 400ppm으로 커졌다. 그러나 다른 인자들은 부

하변동에 따른 변화는 거의 없었다. 이는 IT가 디젤엔진의 고온연소에 미치는 영향이 크기 때문이다. 종합하면 반응치들에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 IT와 Pcr임을 확인할 수 있다.

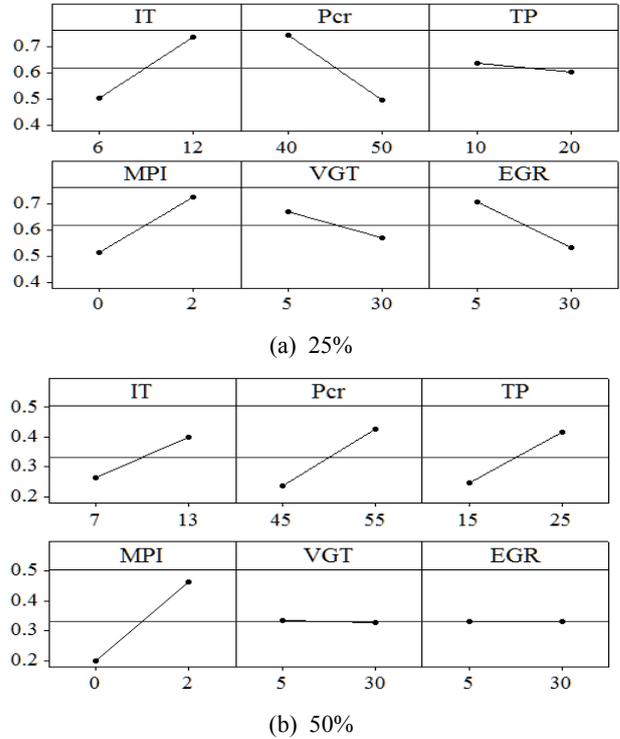


Figure 4: Main effect of each factors on COVimep

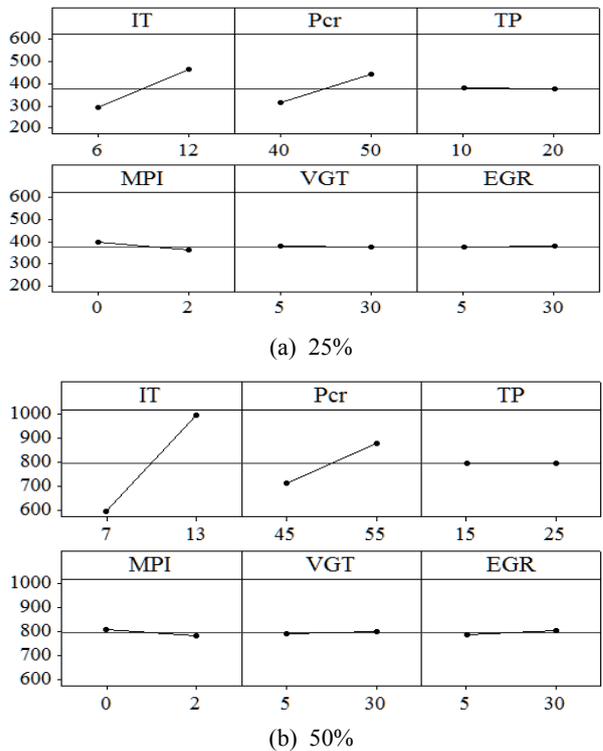


Figure 5: Main effect of each factors on NOx

3.3 교호작용

Figure 6에 각 인자들의 SFC에 대한 교호작용도를 나타내었다. 그림에서 실선은 왼쪽에 표시된 인자가 1수준일 때를 나타내고 점선은 2수준일 때를 나타내며 실선과 점선이 평행에 가까울수록 교호작용의 유의성이 적은 것을 나타낸다. 25% 부하에서는 인자들의 교호작용이 대부분 유의한 것으로 나타났다. 50%에서는 VGT와 EGR가 다른 인자에 미치는 교호작용이 비교적 유의하지 않은 것으로 판단된다. 특히 주효과가 큰 IT와 Pcr에 대한 VGT와 EGR의 교호작용이 유의하지 않은 것으로 판단된다.

Figure 7에는 각 인자들의 COVimep에 대한 교호작용도를 나타내었다. 인자들 대부분은 교호작용이 유의한 것으로 나타나지만 통상 COVimep의 값이 10%를 넘어서는 경우 운전 안정성에 이상이 있는 것으로 판단하는데 여기서는 그래프의 오른쪽 수치에서 알 수 있듯이 1.0% 이하이기 때문에 엔진의 성능에 미치는 영향이 작아서 무시할 수 있다.

Figure 8에는 각 인자들의 NOx에 대한 교호작용도를 나타내었다. NOx에 있어서는 부하에 관계없이 대부분의 인자가 교호작용이 유의하지 않은 것을 알 수 있다. 교호작용에 대해서 종합해보면 SFC에 다음 실험 단계인 반응표면 분석이나 다구치법을 적용함에 있어서 VGT와 EGR과 같은 인자를 크게 유념하지 않아도 됨을 의미한다.

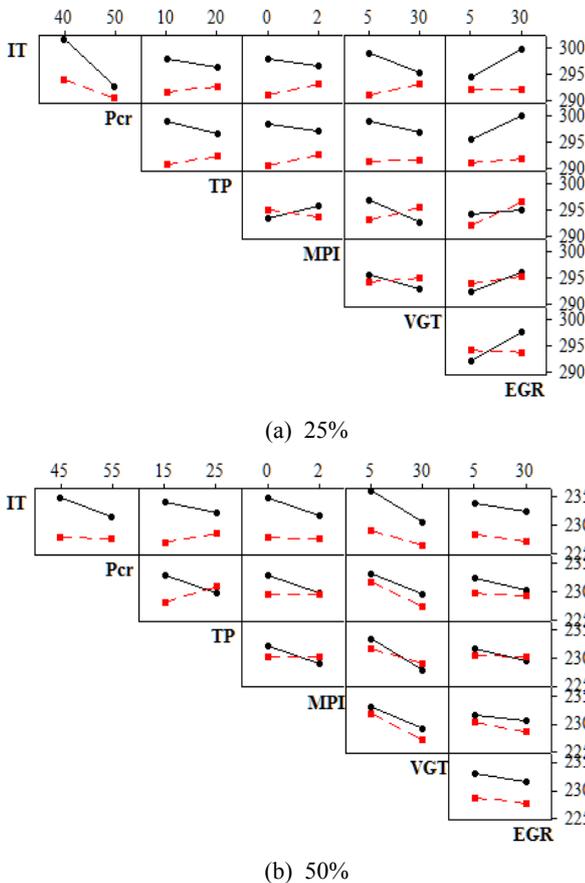


Figure 6: Interaction effect between each factors on SFC

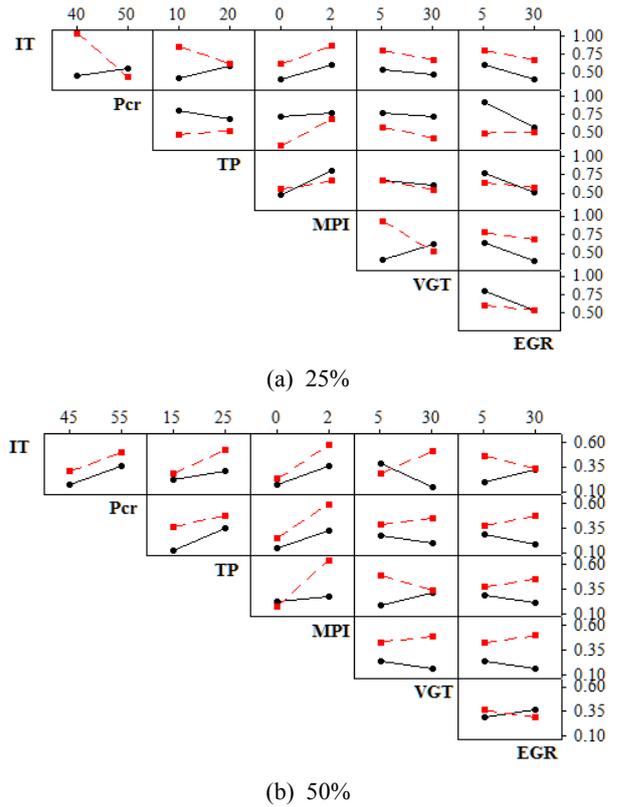


Figure 7: Interaction effect between each factors on COVimep

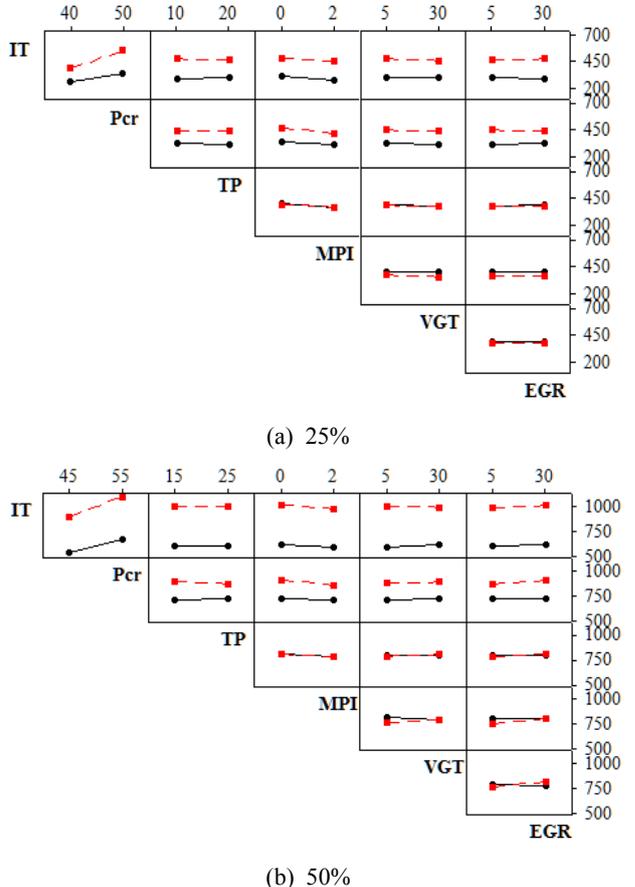


Figure 8: Interaction effect between each factors on NOx

4. 결 론

비에스테르화 바이오 디젤유를 전자제어분사식 디젤엔진에 적용하여 성능 최적화를 실현시키기 위해 주요 인자를 선정하는 기초실험으로 실시간 제어 가능한 6인자에 대해서 부분요인배치법을 실시한 결과, 주효과에 있어서 반응치에 효과가 가장 큰 인자는 IT와 Pcr이었고 영향력의 크기는 부하에 따라 다르게 나타났다. 또 VGT와 EGR의 교호작용은 유의할 수준이 아니어서 최적화를 위한 반응표면분석법을 적용할 때 배제할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Y. T. Oh, "A study on the usability of used vegetable oil as a diesel substitute in diesel engine," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, vol. 22, no. 4, pp. 481-488, 1998 (in Korean).
- [2] S. H. Jung, M. Ishida, S. Yamamoto, H. Ueki, and D. Sakaguchi, "Enhancement of NOx-PM trade-off in a diesel engine adopting bio-ethanol and EGR," International Journal of Automotive Technology, vol. 11, no. 5, pp. 611-616, 2010.
- [3] S. D. Lee and S. H. Jung, "Comparison of combustion characteristics between esterified and non-esterified bio-diesel oil on CRDI diesel engine with turbo-charger," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 37, no. 1, pp. 53-58, 2013 (in Korean).
- [4] G. Daiko industry research, Trend of Technology Market in Bio Fuel and Friendly Environmental Vehicle, BIB, Seoul, p. 85, 2011 (in Korean).
- [5] S. H. Jung, M. S. Kim, S. H. Jang, D. K. Koh, and S. K. Ahn, "Analysis of combustion characteristics of bio diesel fuel in a DI diesel engine using PXI and LabVIEW," Journal of the Korea Society for Power System Engineering, vol. 8, no. 2, pp. 18-23, 2004 (in Korean).
- [6] M. S. Kim, H. C. Doh, D. K. Koh, and S. K. Ahn, "A study on droplet distribution of bio diesel fuels using immersion sampling method," Journal of the Korea Society for Power System Engineering, vol. 10, no. 4, pp. 5-10, 2006 (in Korean).
- [7] S. D. Lee, K. H. Kim, H. S. Lee, and S. H. Jung, "Optimization of NOx emission with blends of bio-diesel oil and diesel fuel using design of experiments," Journal of the Korea Society for Power System Engineering, vol. 17, no. 6, pp. 150-156, 2013 (in Korean).
- [8] M. Pandian, S. P. Sivapirakasam, and M. Udayakumar, "Investigation on the effect of injection system parameters on performance and emission characteristics of a twin cylinder compression ignition direct injection engine fuelled with pongamia bio-diesel-diesel blend using response surface methodology," Journal of Applied Energy, vol. 88, pp. 2663-2676, 2011.
- [9] T. Ganapathy, K. Murugesan and R. P. Gakkhar, "Performance optimization of Jatropa biodiesel engine model using Taguchi approach," Journal of Applied Energy, vol. 86, pp. 2476 -2486, 2009.
- [10] S. Saravanan, G. Nagarajan, and S. Sampath, "Multi response optimization of NOx emission of a stationary diesel engine," Journal of Fuel, vol. 89, pp. 3235-3240, 2010.
- [11] D. Jeong, J. Bang, and K. Min, "A study on the optimization of operating variables in a diesel engine by design of experiments," Proceedings of the 30th KSAE established memorial Conference 08-S0048, pp. 292-297, 2008 (in Korean).
- [12] R. Saidur, M. I. Jahirul, M. Hasanuzzaman, and H. H. Masjuki, "Analysis of exhaust emissions of natural gas engine by using response surface methodology," Journal of Applied Sciences, vol. 8, no. 19, pp. 3328-3339, 2008.