

부분부하에서 비에스테르화 바이오디젤 5% 혼합유의 성능최적화를 위한 실험계획법 적용에 관한 연구

A study on the application of DOE for optimization of blending oil with non-esterified biodiesel fuel at partial engine load

김희중* · 고대권** · 양주호** · 고성위** · 김영식*** · 정태영**** · 정석호**†
Hee-Jung Kim*, Dae-Kwon Koh**, Ju-Ho Yang**, Sung-Wi Koh**,
Yeong-Sik Kim***, Tae-Young Jeong and Suk-Ho Jung**†

(Received 14 January 2016, Revision received 4 March 2016, Accepted 7 March 2016)

Abstract: Non-esterified biodiesel fuel is cheaper than esterified that because of a simple manufacturing process that only consists of filtering. Applicability of this on diesel engine with electronic control system was accomplished, then optimization adopting a fractional factorial design and response surface methodology was carried out at 25% and 50% of engine load in this study. Pressure of common rail and injection timing mainly effected on responses as specific fuel oil consumption and nitrogen oxides regardless of engine load. Estimations were 310.3 g/kWh of specific fuel oil consumption and 237 ppm of nitrogen oxides at 25% load, and 233.2 g/kWh of specific fuel oil consumption and 730 ppm of nitrogen oxides at 50% load. Tests to verify these estimations were accomplished and as the results, specific fuel oil consumption was 300.4 g/kWh and NOx was 277 ppm at 25% load and 236.8 g/kWh and 573 ppm at 50% load.

Key Words : Optimization design, Non-esterified, Biodiesel fuel, Diesel engine, Design of experiment

1. 서 론

일반적으로 바이오 디젤유는 에스테르화 공정을 거치기 때문에 제조비용이 올라간다. 에스테르

화를 하는 이유는 연료로서의 성상을 적절하게 하는 것인데, 현재는 경유에 3% 이하의 소량을 혼합시켜 사용하도록 되어 있다. 연료분사계통의 시장점유율이 높은 BOSCH에서는 5% 이상의 바

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

*김희중 : 동일메탈

**고대권, 양주호, 고성위 : 부경대학교 기계시스템공학과

***김영식 : 부경대학교 기계설계공학과

****정태영 : 부경대학교 실습선 가야호

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

*Hee-Jung Kim : Dongil metal.

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

***Yeong-Sik Kim : Department of Mechanical design Engineering, Pukyong University.

****Tae-Young Jeong : Training Ship Kaya, Pukyong University.

이오 디젤유 혼합 시 보증을 서지 않고 있는 실정이다. 여기서 5% 미만의 바이오 디젤 혼합유라면 굳이 에스테르화가 아닌 단순 필터링만 거친 비에스테르화 바이오 디젤유도 혼합하여 사용할 수도 있다. 폐식용유를 필터링한 한 비에스테르화 바이오 디젤유를 직접분사식 디젤기관에 적용하여 연소 및 분무특성에 관한 연구¹⁻³⁾가 진행되어 왔고 이를 간접분사식 디젤기관에 적용하여 사용 가능성이 있음⁴⁾을 여러 연구를 통해 시사되었다. 다시 말해 비에스테르화 바이오 디젤 혼합유가 충분히 디젤엔진에 사용될 수 있음을 증명한다. 최근에는 이를 바탕으로 부분부하에 있어서 비에스테르화 바이오 디젤 혼합유가 에스테르화 바이오 디젤 혼합유보다 경유에 더 유사한 연소특성을 나타내는 실험 결과⁵⁻⁷⁾도 있다.

그러나 이러한 대부분의 실험은 커먼레일을 장착한 최신의 자동차용 디젤엔진이 아닌 캠식 연료분사시스템에서 실행되었다. 현재의 디젤 엔진은 대부분 전자 제어 방식을 채택하여 사용조건에 최적화를 원하고 있기 때문에 전자제어 방식을 가진 디젤엔진에서의 실험적 연구가 필요하다. 최적화를 위해서는 반응치에 대한 인자들의 효과를 체계적으로 살펴봐야 한다. 제로 베이스에서 엔진 제어맵을 구성하기 위해서는 많은 기초실험이 실시되어야 하는데 본 연구에서는 최소의 실험으로 최고의 데이터를 얻을 수 있도록 하기 위하여 실험계획법을 도입하였다. 제어가능한 6개의 인자(연료분사시기, 커먼레일압력, 스로틀포지션, 파일럿분사, 배기가스재순환, 가변용량터보차저)를 최적화하기 위해서 반응치로 연료소비율, 질소산화물을 설정하였고 이에 미치는 영향이 큰 인자를 부분요인배치법⁸⁾을 이용하여 선정하였다. 그리고 선별된 3개의 인자로 반응표면분석법을 적용하여 최적화를 도출하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험에 사용된 엔진 사양은 Table 1과 같다. 현대차

동차(주)에서 제작한 D4EA로 4기통 수냉식이며 전자제어분사식 가변용량 과급디젤기관이다. 보어와 행정은 각각 83mm와 93mm이며 배기량은 1991cc이다. 최대출력은 4000rpm에서 84kW로 실험은 2000rpm에서 실시하였기 때문에 최대출력을 42kW로 설정하였다. 동력계는 와전류식 동력계인 DYTEK-130(주)환웅기전 제작)을 사용하였으며, 최대 130kW/10000rpm까지 측정 가능하다.

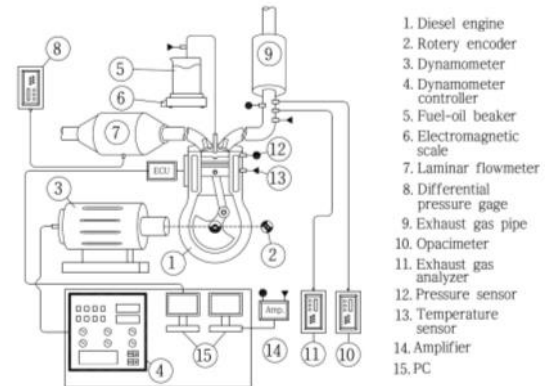


Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

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

엔진의 인자들을 실시간으로 제어하기 위해서 Woodward사의 MotoHawk Control Solutions를 이용하였다. 하드웨어로는 전자제어유닛인 ECM565 - 128과 범용인젝터 드라이버인 UID800을 사용하였고, 시뮬링크 기반 개발 소프트웨어인 MotoHawk로 제어알고리즘을 구현하였다. 그리고 스프레드시트 기반의 사용자 인터페이스인 MotoTune을 이용하여 PC에서 실시간 엔진 제어

가 가능하도록 구성하였다. 본 연구에서는 앞서 설명한 것처럼 6가지 인자를 제어하도록 구성되었는데 각 인자는 다음과 같다. 연료분사시기(IT : Injection Timing), 커먼레일압력(Pcr : Common rail Pressure), 스로틀포지션(TP : Trottle Position), 파일럿분사(PI : Pilot Injection), 배기가스재순환(EGR : Exhaust Gas Recirculation), 가변용량터보차저(VGT : variable geometry turbo-charger)이다.

엔진의 운전상태를 모니터링하기 위하여 엔진 내외부의 압력 및 온도를 측정하였다. 배기가스 성분의 측정은 Eutotron사의 Greenline MK2를 사용하여 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO2), 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx) 및 산소농도를 1초의 샘플링 속도로 180초 간 실시간으로 측정하여 PC에 저장하였다. 연료소비량은 CAS사에서 제작한 CUW-6200H 전자저울을 사용하여 질량단위로 측정하였다. 5분 간의 소모량을 측정하여 연료소비율을 구하였다.

2.2 실험방법

실험은 인자의 수준을 비교적 넓게 잡을 수 있고 백데이터 없이 엔진 운전을 실시하기 때문에 사고의 부담이 적은 저부하부터 실시할 수밖에 없었다. 앞서 설명한 것처럼 실험은 주요인자선별을 위한 1차 실험으로 부분요인배치법을 통해 실시하였고, 선별된 인자를 적용하여 2차 실험으로 반응표면분석법을 통해 최적화를 실시하였다. 모든 실험은 2000rpm에서 실시되었고 충분한 엔진의 예열을 거친 후, 조건의 변화가 있으면 약 5분의 안정기를 거친 후 10분 간 데이터들을 측정하였다. 1차 실험에서는 6인자 2수준의 부분요인배치법(2⁶⁻¹)을 적용하였고, 부분부하인 25%, 50%에서 실험하였다. Table 2에 각 부하별 인자의 수준에 대해서 나타내었다. 인자 당 수준의 선정은 엔진 성능의 일정범위를 임의로 선정하였으며, 각 부하당 인자들의 수준이 분별 가능한 영역을 선정하였다. 즉, 일정 수준의 차가 나는 값을 적용하여 그 결과값을 확인하고자 하였으며, 선정한 값을 통해 실험을 진행하였다. 실험계획법을 통한 실험은 검정의 일관성이 있을 경우, 실험결과

Table 2 Level of factors on tests by fractional factorial design

Factor \ Level	25		50	
	1	2	1	2
IT(°TDC)	6	12	7	13
Pcr(Mpa)	40	50	45	55
PI(ms)	0	2	0	2
TP(%)	10	20	15	25
EGR(%)	5	30	5	30
VGT(%)	5	30	5	30

Table 3 Level of factors on tests by response surface methodology

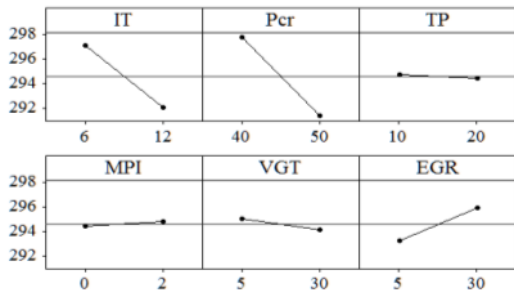
Factor \ Level	25			50		
	1	2	3	1	2	3
IT(°TDC)	-4	-9	-14	-5	-10	-15
Pcr(MPa)	30	45	60	35	50	65
TP(%)	5	15	30	5	20	35
PI(ms)	2			0		
EGR(%)	30			5		
VGT(%)	5			30		

신뢰성을 정확히 평가하기 어렵기 때문에 실험 순서에서 랜덤 실험을 진행한다. 랜덤 실험은 선택된 실험 계획을 무작위로 하여 실험하게 된다. 즉, 순차적 실험 계획이 아닌 무작위 실험 계획으로 변경하여 실험하는 것이다. 이러한 무작위 실험 계획은 Minitab v16을 이용하여 무작위 실험 계획을 세웠다. 2차 실험에서는 3인자 3수준의 반응표면분석법을 적용하였다. Table 3에 인자와 인자의 수준을 나타내었다. 선정된 3인자 외에는 일정하게 하였다. Box-behnken법으로 설계한 실험순서에 따라 실험하였다.

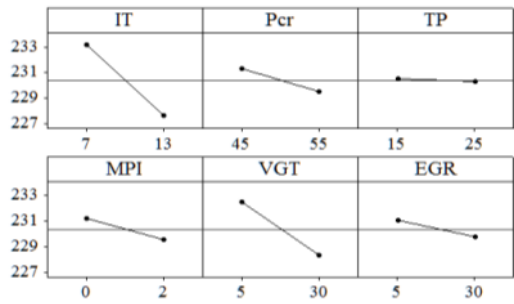
3. 결과 및 고찰

3.1 부분요인배치법

3.1.1 주효과



(a) 25%

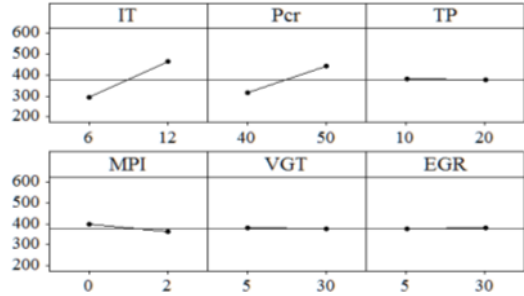


(b) 50%

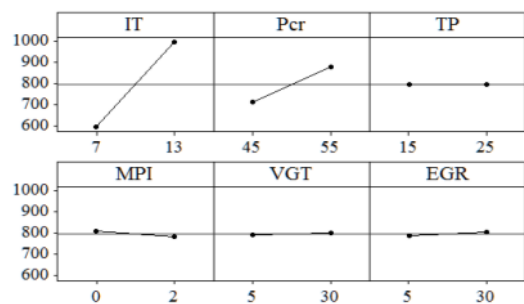
Fig. 2 Main effects of 6 factors on specific fuel consumption at each load

Fig. 2에는 부하 25%, 50%에서 연료소비율에 대한 인자별 수준에 따른 주효과도를 나타내었다. IT의 경우 전 부하영역에서 1수준에 비해 2수준이 1.7~2.4% 낮게 나타났다. Pcr의 경우 25% 부하에서는 2.2% 2수준이 낮게 나타났으나 50%에서는 0.8% 낮게 나타났다. 이는 고부하로 갈수록 Pcr이 어느 정도 높아지면 연소에 영향을 미치지 않기 때문인 것으로 사료된다. 다른 인자에 있어서는 전 부하영역에서 수준에 따른 연료소비율에 미치는 영향이 거의 나타나지 않았다.

Fig. 3에는 부하 25%, 50%에서 질소산화물에 대한 인자별 수준에 따른 주효과도를 나타내었다. IT의 경우, 1수준에 비해 2수준이 25% 부하에서는 37.5%, 50% 부하에서는 40.1%로 부하가 증가할수록 높게 나타났다. 이는 IT가 부하가 증가할수록 연소온도를 높이는데 큰 영향을 미치기 때문으로 사료된다. Pcr의 경우 25% 부하에서는 28.3%, 50% 부하에서는 19.2%로 부하가 증가할수록 2수준이 높게 나타나는 경향은 IT와 같으나 증



(a) 25%



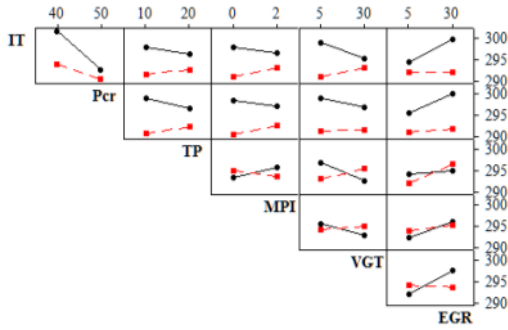
(b) 50%

Fig. 3 Main effects of 6 factors on nitrogen oxides at each load

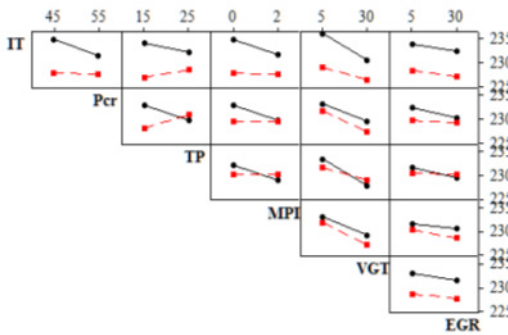
가율은 반대의 현상을 나타내었다. 고부하에서는 분사압력이 높아져도 IT처럼 연소온도에 미치는 영향이 커지지는 않는다는 것을 알 수 있다. 다른 인자에 있어서는 전 부하영역에서 수준에 따른 질소산화물에 미치는 영향이 수% 이내로 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.

3.1.2 교호작용

Fig. 4에 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. Fig. 5에는 각 인자들의 NOx에 대



(a) 25%



(b) 50%

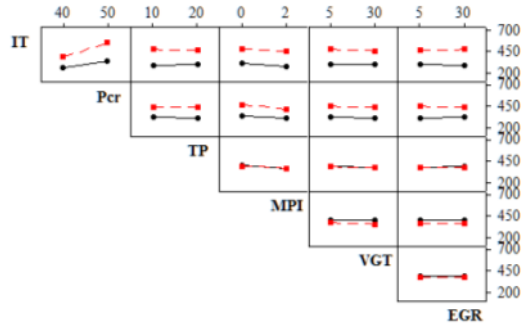
Fig. 4 Interaction effect between each factors on specific fuel consumption at each load

한 교호작용도를 나타내었다. NOx에 있어서는 부하에 관계없이 대부분의 인자가 교호작용이 유의하지 않은 것을 알 수 있다. 교호작용에 대해서

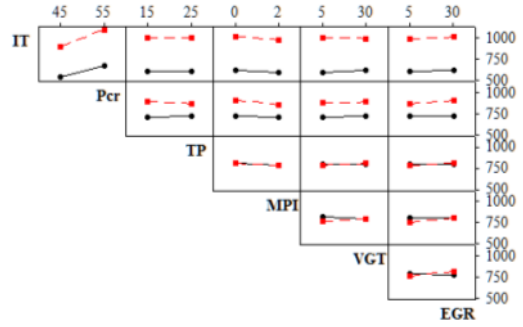
종합해 보면 SFC에 다음 실험 단계인 반응표면 분석이나 다구치법을 적용함에 있어서 VGT와 EGR과 같은 인자를 크게 유념하지 않아도 됨을 의미한다. 이상의 주효과와 교호작용의 분석결과에 따라 교호작용에 유의성이 있기 때문에 최적화에는 반응표면분석법의 적용이 용이하다고 판단하였고 주효과가 큰 IT와 Pcr 외에 TP를 추가적으로 인자로 선정하여 최적화를 실시하였다.

3.2 반응표면분석법

앞서 검증된 신뢰성을 통해 RSM의 최적 모델링을 설정할 수 있다. 모델링의 방식은 선형모델과 곡선모델 두가지로 표현할 수 있으며, 본 연구에서는 실험 결과값에 변수가 발생할 가능성을



(a) 25%



(b) 50%

Fig. 5 Interaction effect between each factors on nitrogen oxides at each load

염두하여 곡선모델을 선정하여 진행하였다. 곡선모델은 선형적으로 결과값이 나오지 않을 경우 사용가능한 방법으로 본 곡선모델의 유도식은 다음과 같다.

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (1)$$

여기서 \hat{y} 는 실험의 최적값, β 는 실험 결과값, x 는 실험 변수값, ϵ 은 잔여값을 나타낸다. 위의 유도식은 변수의 개수와 수준수에 따라 식을 유도할 수 있다. 본 실험에서는 3인자 3수준의 실험을 진행하였고, 신뢰성검증을 통해 얻은 결과 값을 각 수식을 대입하여 모델링하였다. Fig. 6과 7에 그 결과를 나타내었다.

유도된 모델로 관심영역 내 최적값을 도출할 수 있다. Fig. 8에는 부하 25%에 대해 305 g/kWh와 230 ppm을 제한값으로 지정하였을 때의 최적

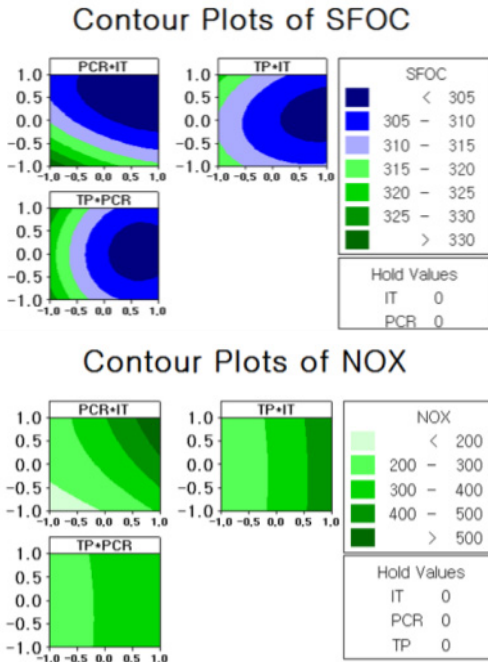


Fig. 6 Response surface method plot on SFOC and NOX at load 25%

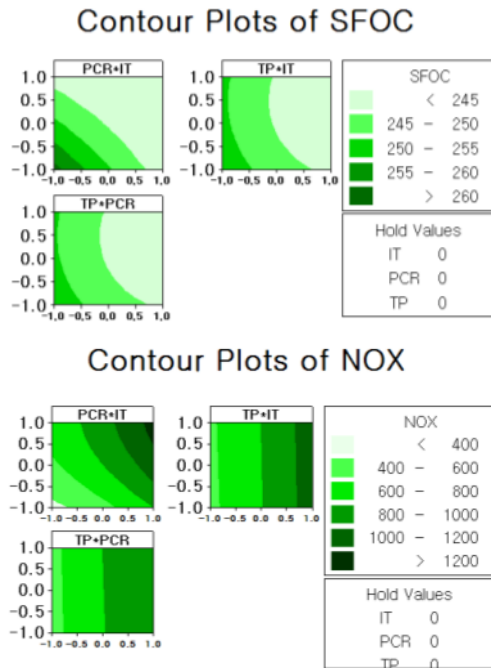


Fig. 7 Response surface method plot on SFOC and NOx at load 50%

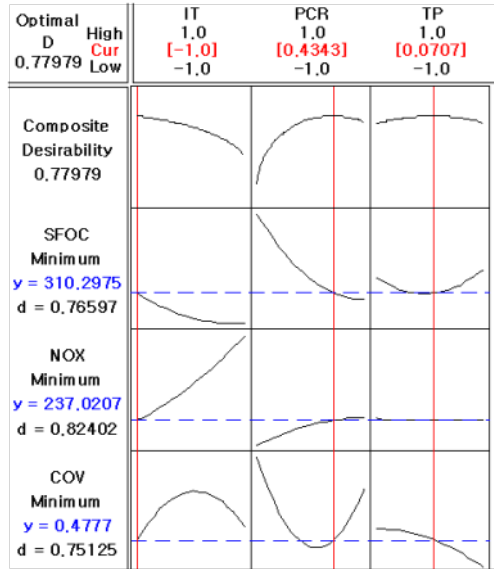


Fig. 8 Optimal value on load 25%

값을 도출하였으며, Fig. 9에서 부하 50%에 대해 240 g/kWh와 700 ppm을 제한값으로 지정하였을 때의 최적값을 도출하였다. 25% 부하에서 인자 최적 수준은 IT는 -1.0, PCR은 0.4343, TP는 0.0707 수준이었고, 반응치 최적값은 SFOC는 310.3 g/kWh, NOx는 237 ppm이었다. 50% 부하에서

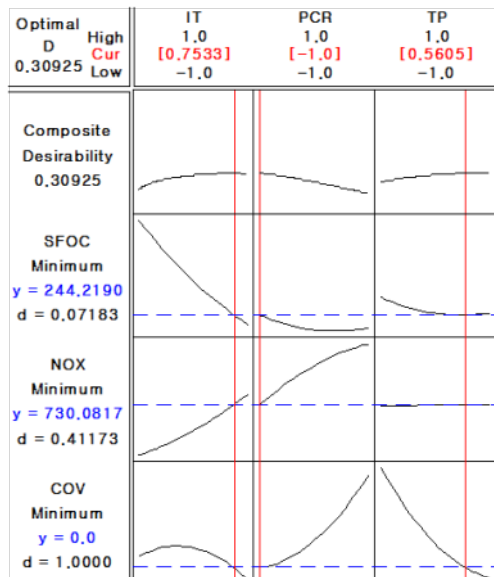


Fig. 9 Optimal value on load 50%

인자 최적 수준은 IT는 0.7533, PCR은 -1.0, TP는 0.5605이었다. 반응치 최적값은 SFOC는 233.2 g/kWh, NOx는 730 ppm이었다.

이를 바탕으로 각 인자의 수준으로 검증실험을 한 결과 25%에서의 연료소비율은 300.4 g/kWh, 질소산화물은 277 ppm이고, 50%에서의 연료소비율은 236.8 g/kWh, 질소산화물은 573 ppm이었다. 반응표면분석에 의한 값과 이는 실험시기가 달라 대기조건과 연료온도 등 주위환경에 의해 생길 수 있는 오차가 포함된 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 비에스테르화 바이오 디젤 혼합유의 성능최적화를 위하여 먼저 사용가능성에 대한 실험을 실시하였다. 경유와 에스테르화 바이오 디젤 혼합유, 비에스테르화 바이오 디젤 혼합유의 성능을 검토한 결과 비에스테르화 바이오 디젤 혼합유가 경유와 더 유사한 성능을 나타내는 것을 확인하였다. 결과로부터 전자제어 분사식 디젤 엔진에서의 성능 최적화를 위해 관심영역에서 부분요인배치법과 반응표면분석법을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 부분요인배치법을 통하여 연료소비율과 질소산화물에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 부하에 관계없이 연료분사시기와 커먼레일압력이었고, 6인자 모두 각 부하에서 서로 교호작용이 유의한 것으로 나타났다.

2. 반응표면분석법을 통해서 90% 이상의 신뢰도를 가진 최적값을 찾을 수 있었다.

3. 25% 부하에서의 인자 최적 수준은 IT는 -1.0, PCR는 0.4343, TP는 0.0707 수준이었고, 연료소비율의 최적값은 310.3 g/kWh, 질소산화물은 237 ppm이었다. 검증실험 결과는 300.4 g/kWh, 277 ppm이었다.

4. 50% 부하에서의 인자 최적 수준은 IT는 0.7533, PCR는 -1.0, TP는 0.5605 수준이었고, 연료소비율의 최적값은 233.2 g/kWh, NOx는 730 ppm이었다. 검증실험 결과는 236.8 g/kWh, 573 ppm이었다.

5. 최적화 도출값과 검증실험 결과값에 차이는 있었지만 거의 유사한 값을 얻었기 때문에 실험 계획법의 적용은 의미가 있었고 앞으로 75% 및 100% 부하에서의 최적점을 찾는 연구가 더 진행되어야 한다.

References

1. S. H. Jung et al., 2004, "Analysis of Combustion Characteristics of Bio Diesel Fuel in a DI Diesel Engine Using PXI and LabVIEW", KSPSE, Vol. 8, No. 24, pp. 18-23
2. M. S. Kim et al., 2006, "A Study on Droplet Distribution of Biodiesel Fuels Using Immersion Sampling Method", KSPSE, Vol. 10, No. 4, pp. 5-10
3. M. S. Kim, 2008, "Combustion characteristics of bio diesel fuel using waste food oil", Ph.D thesis, Pukyong National University, Busan, Korea.
4. Y. T. Oh et al., 2010, "The Application of Non-esterified Biodiesel in an Indirect Injection Diesel Engine", KSAE Annual Conference 2010, pp. 1015-1020
5. 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
6. 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
7. 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
8. D. K. Koh and S. H. Jung, 2015, "Selection of Factors for Performance Optimization on Non-esterified Biodiesel Fuel Using Fractional Factorial Design", JKOSME, Vol. 39, No. 1, pp. 8-12