

비지배 정렬 유전 알고리즘(NSGA-II)을 이용한 이중연료 RCCI 엔진의 연소성능 최적화에 대한 수치적 연구

함윤영^{1*}, 장효정²

¹우석대학교 기계자동차공학과, ²한단대학교 기계전기공학부

A Numerical Study on the Optimization of Combustion Performance in Dual Fuel RCCI Engine Using NSGA-II

Yun-Young Ham^{1*}, Xiaojing Zhang²

¹Department of Mechanical & Automotive Engineering, Woosuk University

²School of Mechanical & Electrical Engineering, Handan University

요약 디젤엔진의 열효율을 높이면서 NO_x와 PM을 효과적으로 저감시키기 위해 저온연소(LTC: Low Temperature Combustion)전략이 개발되어 왔다. 최근 이중 연료를 사용하는 반응성 제어 압축착화(RCCI ; Reactivity Controlled Compression Ignition) 방식에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. RCCI방식은 HCCI나 PCCI방식보다 연소 제어에 유리하기 때문에 보다 넓은 작동영역에서 운전이 가능한 것으로 알려져 있으나 두 개의 연료를 사용하기 때문에 연료분사와 관련된 제어인자가 많아 전체 운전 영역에서 최적의 운전조건을 설정하는 매핑작업에 많은 시간과 비용이 소요되는 문제가 있다. 본 연구에서는 저반응성 연료로는 가솔린을 사용하고 고반응성 연료로는 디젤을 사용하는 RCCI 엔진에서 비지배 정렬 유전 알고리즘(NSGA-II)을 도입하여 연소성능 최적화를 위한 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과, NSGA-II를 이용한 방법이 RCCI엔진의 연소성능 최적화에 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였으며, 1300rpm, 6bar 조건에서 저반응성연료비율은 0.68, 이단 분사 시 첫 번째 연료분사시기는 -56°ATDC, 두 번째 연료분사시기는 -26°ATDC, 이단 분사 시 첫 번째 분사량 비율은 0.4의 조건으로 운전 시 열효율 0.47, NO_x는 0.054g/kWh, soot는 0.00072g/kWh의 결과를 얻었다. 최적화 시뮬레이션 과정을 통해 실제 엔진 매핑 시험 시간 및 비용을 크게 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract Low-temperature combustion (LTC) strategies have been developed to effectively reduce NO_x and PM while increasing the thermal efficiency of diesel engines. Recently, reactivity controlled compression ignition (RCCI) using dual fuel has been studied. The RCCI method is known to be able to operate in a wider operating area than HCCI or PCCI because it has an advantage in combustion control. But because it uses two fuels, there are many control factors related to fuel injection, and mapping work to set optimal operating conditions in the entire operating area is time-consuming and costly. In this study, the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) was introduced to optimize the combustion performance of an RCCI engine using gasoline as a low-reactivity fuel and diesel as a high-reactivity fuel. A numerical analysis was performed, and the results confirm that the method using NSGA-II can be effectively used to optimize the combustion performance. A thermal efficiency of 0.47, NO_x level of 0.054 g/kWh, and soot level of 0.00072 g/kWh were obtained when the ratio of low-reactive fuel was 0.68, the first fuel injection timing was -56° ATDC, the second fuel injection timing was -26° ATDC, and the first injection fuel ratio was 0.4 for two-stage injection at 1300 rpm and 6 bar. The optimization simulation process is expected to significantly reduce the time and cost of engine mapping tests.

Keywords : Diesel Engine, Low Temperature Combustion, Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II, Reactivity Controlled Compression Ignition, Thermal Efficiency

*Corresponding Author : Yun-Young Ham(Woosuk Univ.)

email: yyham@woosuk.ac.kr

Received July 26, 2023

Accepted October 6, 2023

Revised August 9, 2023

Published October 31, 2023

1. 서론

최근 다양한 수송 분야에서 전기 동력으로서의 전환이 빠르게 증가하고 있는 추세이나 전체 수송기기 시장에서 기존 내연기관이 차지하고 있는 비중은 매우 높으며, 향후에도 내연기관의 적용은 꾸준히 지속될 전망이다. 열효율 향상 및 배출가스 저감을 위한 기술개발은 반드시 필요하다.

가솔린 엔진에 비해 디젤 엔진은 높은 압축비를 사용하고 펌핑 손실이 적어 열효율이 더 높은 장점이 있지만 압축착화에 의한 확산연소로 연소온도가 높고 혼합이 균일하지 않아 많은 양의 질소산화물(NOx)과 매연(PM)을 배출하는 문제가 있다. 이를 저감하기 위해 SCR, DPF와 같은 다양한 후처리장치들이 적용되고 있으나 시스템 비용이 크게 증가하게 된다[1].

디젤 엔진의 열효율을 높이면서 NOx와 PM을 동시에 저감하기 위해 저온연소(Low Temperature Combustion) 전략이 개발되어 왔다. 저온연소 개념은 조기에 연료를 분사함으로써 연료와 공기가 예혼합할 충분한 시간을 주어 균질, 희박하게 혼합기를 형성하여 연소 온도를 낮추고 실린더 벽으로의 열손실을 줄여 열효율을 향상시키면서 NOx와 PM의 발생을 억제하는 방법이다. 균질 혼합 압축착화(HCCI ; Homogeneous Charge Compression Ignition)와 예혼합 압축착화(PCCI ; Premixed Charge Compression Ignition)방식이 대표적인 저온연소전략인데, 착화시기 제어의 어려움이 있고, 적용 가능한 부하 조건이 제한적이라는 단점이 있다[2,3].

최근에는 이중 연료를 사용하는 반응성 제어 압축착화(RCCI ; Reactivity Controlled Compression Ignition) 방식에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. RCCI 연소 방식은 서로 다른 반응성을 지닌 두 개의 연료를 사용하는데, 가솔린이나 천연가스와 같은 저반응성 연료를 포트 분사를 통해 흡기 과정 동안 먼저 분사하여 공기와 혼합시키고, 디젤과 같은 고반응성 연료를 압축 과정 동안 연소실에 직접 분사하여 연소실 내에서 두 연료를 층상화시켜 착화를 일으키도록 한다. 두 연료의 혼합비율을 조절함으로써 열 방출률을 제어할 수 있으며 과도한 압력상승률에 의한 노킹도 방지할 수 있다. RCCI방식은 HCCI나 PCCI방식보다 연소 제어에 유리하기 때문에 보다 넓은 작동영역에서 운전이 가능한 것으로 알려져 있다. 그러나 전체적으로 낮은 반응성으로 인해 HC와 CO가 많이 발생되어 이에 대한 별도의 대책이 필요한 방식이다[4-8]. 또한 두 개의 연료를 사용하기 때문에 연료분

사와 관련된 제어인자가 많아 전체 운전 영역에서 성능, 연비, 배출가스 등의 연소 성능 목표를 만족하는 최적의 운전조건을 설정하는 매핑작업에 많은 시간과 비용이 소요되는 문제가 있어 이에 대한 해결 방안이 필요하다.

비지배 정렬 유전 알고리즘 II(NSGA-II)은 다목적 최적화 문제를 해결하도록 설계된 강력한 최적화 알고리즘이다. 여러 상충하는 목표 중에서 최상의 절충안, 즉 비지배적 솔루션들을 파레토 프론트로 정렬시키는 유전 알고리즘이다. 본 연구에서는 저반응성 연료로는 가솔린을 사용하고 고반응성 연료로는 디젤을 사용하는 RCCI 엔진에서 다목적 유전 알고리즘을 도입하여 연소성능 최적화를 위한 수치해석을 수행하였다. 여러 연소성능 지표 중에 열효율과 배출가스 NOx와 soot(PM의 주성분)을 3가지 목표변수로 선정하고, 이에 영향을 미치는 연료분사 매개변수들로서 저반응성연료비율, 디젤 이단 분사 시 첫 번째 연료분사시기, 두 번째 연료분사시기, 이단 분사 시 첫 번째 분사량 비율의 4가지를 작동매개변수로 선정하여 비지배 정렬 유전 알고리즘 II(NSGA-II)을 적용하였고, 이를 통해 효과적으로 연소성능이 가장 좋은 연료분사조건을 구하고자 하였다.

2. 수치 해석

2.1 해석 모델

시뮬레이션 대상 엔진은 2.44L의 Caterpillar (SCOTE) 단기통엔진이며 주요 제원은 Table 1과 같다. 계산 시간을 단축하기 위하여 1/6섹터에 해당하는 연소실을 해석 공간으로 사용하였다.

Table 1. Engine specifications

Spec.	Data
Base engine type	Caterpillar SCOTE
Bore x stroke	13.72 x 16.51 cm
Connecting rod	21.16 cm
Displacement	2.44 L
Compression ratio	16.1 : 1
Intake valve opening (IVO)	-335 °ATDC
Intake valve closing (IVC)	-95 °ATDC
Exhaust valve opening (EVO)	130 °ATDC
Exhaust valve closing (EVC)	-355 °ATDC

RCCI 엔진 해석을 위해 ANSYS FORTE 프로그램을 사용하였다. 난류는 RNG(Re-Normalization) k-ε 모

델을, 분무된 액적의 분열은 KH-RT(Kelvin-Helmholtz Rayleigh-Taylor) 모델로 모사하였다. 배출가스와 관련해서는 NOx 단순화 모델[9]과 PM의 대부분을 차지하는 soot 계산에 two-step 모델[10]을 사용하였다. 연소과정의 상세 화학반응(detailed chemistry) 계산을 위해서 CHEMKIN-PRO를 사용하였다.

2.2 해석 조건

사물레이션은 1300rpm, IMEP 6bar, 당량비(Equivalence ratio) 0.29인 조건에서 수행하였다.

Table 2는 본 해석에서의 엔진작동 조건이다. 저반응성연료인 가솔린은 흡기 과정 동안 공기와 예혼합되며, 고반응성연료인 디젤은 압축 과정 동안 이단으로 분사된다. 해석은 흡기밸브 닫힘 시기부터 배기밸브 열림 시기까지 진행한다. 가솔린과 디젤 연료의 전체 질량은 66.2 mg/cycle 이며, 저반응성연료의 비율은 40~80%, 디젤 연료의 이단 분사 시 첫 번째 연료분사시기는 -80~-50°ATDC, 두 번째 연료분사시기는 -40~-20°ATDC, 이단 분사 시 첫 번째 분사량 비율은 40~80% 범위에서 해석을 수행하였다.

Table 2. Engine operating conditions

Nominal IMEP (bar)	6
Engine speed (rev/min)	1300
EGR rate (%)	0
Equivalence ratio	0.29
Total fuel (mg/cycle)	66.2
Gasoline percent by mass(%)	40~80
Diesel 1 st injection (°ATDC)	-80 ~ -50
Diesel 2 nd injection (°ATDC)	-40 ~ -20
1 st injection fuel percentage	40 ~ 80

3. 해석 결과

3.1 디젤 연료분사 파라미터의 영향

Fig. 1은 저반응성 연료 비율이 열효율, NOx, soot에 미치는 영향을 나타낸다. 저반응성 연료 비율을 증가시켰을 때 NOx는 감소하고 soot는 60% 이상에서 증가하는 경향을 갖는다. 열효율은 65% 정도에서 최대값을 나타낸다. Fig. 2는 첫 번째 분사시기의 영향이다. 분사시기를 진각시킴에 따라 NOx는 감소하고 soot는 감소하다가 약간 증가하는 경향을 나타낸다. -55° 부근에서 열효율이 가장 높다. Fig. 3은 두 번째 분사시기의 영향이다.

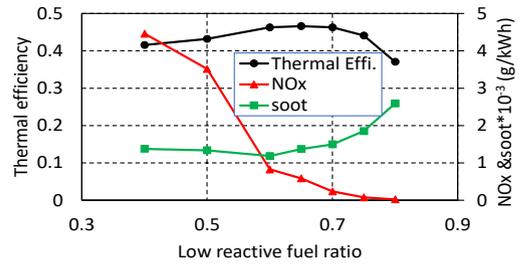


Fig. 1. Effect of low reactive fuel ratio on thermal efficiency, NOx and soot(1st injection timing -60°, 2nd injection timing -30°, 1st injection fuel ratio 0.6)

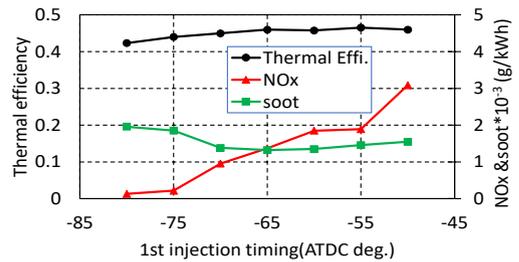


Fig. 2. Effect of 1st injection timing on thermal efficiency, NOx and soot(low reactive fuel ratio 0.6, 2nd injection timing -30°, 1st injection fuel ratio 0.6)

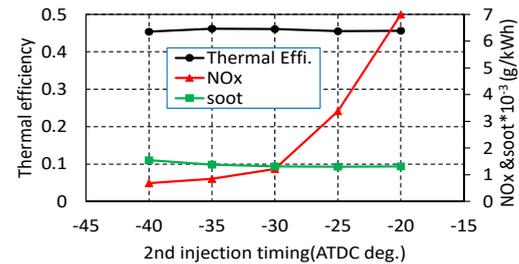


Fig. 3. Effect of 2nd injection timing on thermal efficiency, NOx and soot(low reactive fuel ratio 0.6, 1st injection timing -60°, 1st injection fuel ratio 0.6)

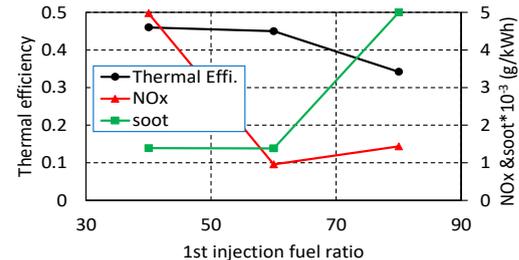


Fig. 4. Effect of 1st injection fuel ratio on thermal efficiency, NOx and soot(low reactive fuel ratio 0.6, 1st injection timing -60°, 2nd injection timing -30°)

분사시기를 진각 시킬수록 NO_x는 감소하나 soot와 열 효율에 미치는 영향은 작음을 알 수 있다. Fig. 4는 첫 번째 분사량의 비율에 대한 영향을 나타낸다. 첫 번째 분사량이 적으면 열효율은 높지만 NO_x가 많이 발생하고 반대로 많으면 soot가 증가하는 경향을 보인다.

위에서 살펴본 바와 같이 4가지 디젤 연료분사 파라미터는 모두 연소성능에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다. 그러나 어느 하나의 파라미터 변화 효과를 살펴보기 위해서 다른 3개의 파라미터는 고정시켜서 구한 결과이기 때문에 해석이 제한적이며 전체 변수 범위 안에서 가장 최적의 조건을 찾기 위해서는 보다 효과적인 최적화 방법이 필요하다.

3.2 최적화 정의

다목적 최적화 설계 방법인 비지배 정렬 유전 알고리즘 II(NSGA-II)은 파레토 프론트 개념을 도입하여 연소성능 최적화에 사용될 수 있다. 이중 연료 RCCI 엔진의 연소 성능은 여러 작동매개변수에 의해 영향을 받는다. 본 연구에서는 연소성능의 지표로써 열효율, NO_x, soot를 목표변수로 선정하였다. 디젤엔진에서 NO_x와 soot는 상충(trade-off)관계에 있으며 동시 저감하는 것이 필요하다. 세 가지 목표변수에 영향을 미치는 연료분사 매개변수들로서 저반응성연료비율, 이단 분사 시 첫 번째 연료분사시기, 두 번째 연료분사시기, 이단 분사 시 첫 번째 분사량 비율의 4가지를 작동매개변수로 선정하였다. Table 3은 각 매개변수의 작동 범위이다.

Table 3. The optimization parameters and value range

Parameters	value range
Low reactive fuel ratio	0.4~0.8
Diesel first injection timing	-80~-50°CA
Diesel second injection timing	-40~-20°CA
Diesel first injection ratio	0.4~0.8

3.3 실험계획법

유전 알고리즘에 기반한 최적화는 작동매개변수와 목표변수 간의 함수관계를 구하는 것이 필요하다. 먼저 작동매개변수들의 합리적인 조합을 구성하기 위하여 실험 계획법(DOE)을 사용하였다. 본 연구에서 선택한 DOE 방법은 라틴 하이퍼 큐브(Latin hyper cube) 방법이며, 균일한 통계분포를 동일한 N개의 간격으로 나누고 각 간

격에서 임의의 값을 선택하여 균일한 분포에 부합하는 난수를 생성하는 방법이며 유전 알고리즘 최적화에 적합하다. 이러한 방법으로 Fig. 5에서와 같이 각 작동조건에서 100개의 샘플 포인트를 구성하였다.

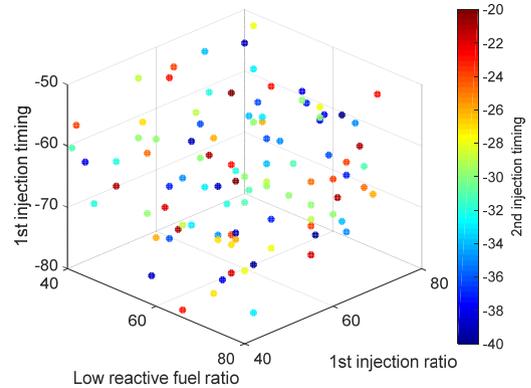


Fig. 5. The design space under different operating condition

3.4 목적함수

DOE 결과를 바탕으로 구한 100개의 각 샘플 포인트에서의 시뮬레이션을 통해 연소 성능 결과와 배출 성능 결과를 얻었다. 이를 바탕으로 작동매개변수(저반응성연료비율, 이단 분사 시 첫 번째 연료분사시기, 두 번째 연료분사시기, 이단 분사 시 첫 번째 분사량 비율)와 목표변수(열효율, NO_x, soot) 간의 함수 관계를 구하였다. 목적 함수의 정확도를 높이기 위해 피팅 모델은 상수항, 선형항, 교차항, 제곱항, 다중공선성을 포함하는 다중선형 회귀분석 모델로 선정하였다. 식1 ~ 식3은 열효율, NO_x, soot에 대한 목적함수식이다. 여기서 변수 X₁~X₄는 각각 저반응성연료비율, 이단 분사 시 첫 번째 연료분사시기, 두 번째 연료분사시기, 이단 분사 시 첫 번째 분사량 비율이다.

$$Y = -0.0175X_1 + 0.2327\sqrt{X_1} - 0.0022X_2 - 0.0081X_4 + 9.713e^{-5}\sqrt{X_1}X_2 - 8.4382e^{-4}\sqrt{X_1}X_3 - 0.000616\sqrt{X_1}X_4 + 5.614e^{-6}X_2^2 - 6.717e^{15}X_4^2 - 0.2103 \quad (1)$$

$$Y = -18.0329\sqrt{X_1} - 1.5702\sqrt{X_2} - 0.0695X_3 + 0.537X_4 + 0.0089\sqrt{X_1}X_2 - 0.0506\sqrt{X_1}X_3 - 0.0629\sqrt{X_1}X_4 + 0.6938X_1 - 7.9710\sqrt{X_3} + 143.1238 \quad (2)$$

$$Y = 0.0019\sqrt{X_1} - 9.295e^{-6}\sqrt{X_2} - 2.03e^{-4}X_4 + 8.899e^{-6}\sqrt{X_1}X_2 - 4.135e^{-5}\sqrt{X_1}X_3 - 6.381e^{-6}\sqrt{X_1}X_4 + 1.56e^{-5}X_1 - 3.76e^{-7}X_2^2 + 4.714e^{-6}X_4^2 - 0.0169 \quad (3)$$

100개 샘플 포인트에서의 시뮬레이션값과 목적함수로 계산된 피팅값과의 비교를 Fig. 6~8에 나타내었다. 피팅 정확도를 보장하기 위해 데이터의 일부 비정상적인 지점은 삭제하였다. 평균 절대오차(MAE)는 열효율 식에서 0.01, NOx 식에서 0.77, soot 식에서 0.00057로 각 함수식의 피팅 정확도가 비교적 높음을 알 수 있다.

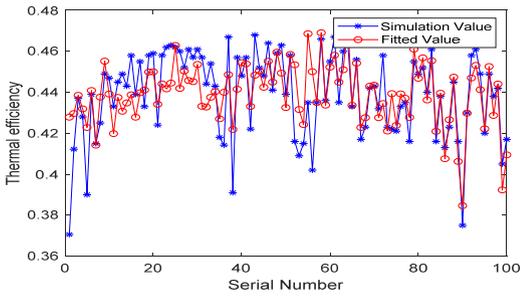


Fig. 6. Comparison of thermal efficiency simulation value and fitted value

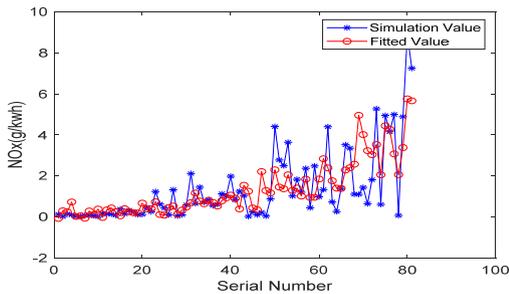


Fig. 7. Comparison of NOx simulation value and fitted value

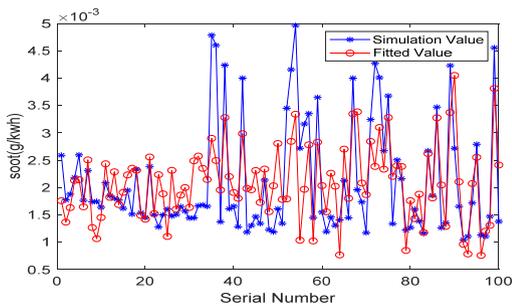


Fig. 8. Comparison of soot simulation value and fitted value

3.5 다목적 최적화 결과

맷랩 프로그램을 이용하여 3개의 목표 변수에 대한 비지배 정렬 유전 알고리즘(NSGA-II)을 실행하였다. NSGA-II는 위에서 구한 함수식을 사용하여 목표변수 사

이에서 더 이상 우세하지 않은 비지배 최적해들을 찾아 파레토 프론트로 정렬하는 알고리즘이다. 3개 목표변수가 최소화되는 최적해들로 정렬하여야 하기 때문에 낮은 NOx와 soot는 그대로 두고, 높을수록 좋은 열효율은 역수로 취하였다. 반복할 세대 수는 800개로 설정하였다. Fig. 9는 알고리즘을 수행한 파레토 프론트의 결과를 3차원으로 나타낸 그림이다.

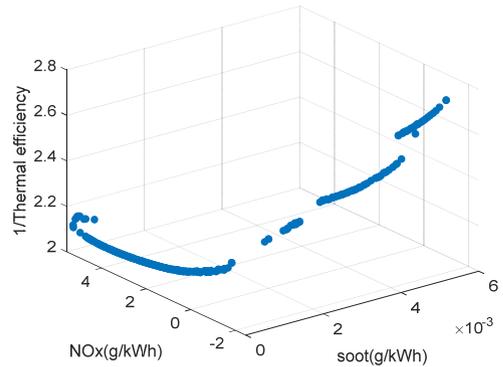


Fig. 9. Comparison of soot simulation value and fitting value

그리고 파레토 프론트로 선정된 최적해들 중에서 3가지 목표변수들의 목표값(Goals)을 충족한 최적해들만 선택하였는데 Table 4에서 보는 것과 같이 열효율은 0.45 이상, NOx와 soot는 0.4g/kWh, 0.01g/kWh 이하를 충족하여야 한다. 그리고, 엔진의 내구성 확보와 노킹 방지를 위하여 제한조건(Limits)으로 최대압력상승률과 최대압력을 각각 20bar/deg와 200bar로 설정하였고 이 값을 넘는 최적해들은 제외하였다. 이러한 한계값과 제한값의 조건들을 만족하여 선택된 최적해들은 Fig. 10과 같이 9개로 구해졌다.

파레토 프론트는 여러 개의 비지배적인 최적해들로 이루어진 집합이므로, 그 중에서 가장 우수한 값을 찾기 위해서 각 목표변수에 가중치를 부여하여 합산된 점수를 계산하여야 한다. 그러나 열효율, NOx, soot는 크기 및 단위가 같지 않기 때문에 선형 변환으로 정규화하여 0에

Table 4. The optimization goals and limits

	Evaluated parameters	Values
Goals	Thermal efficiency	0.45
	NOx(g/kWh)	0.4
	soot(g/kWh)	0.01
Limits	PPRR(bar/deg)	20
	Max. pressure	200

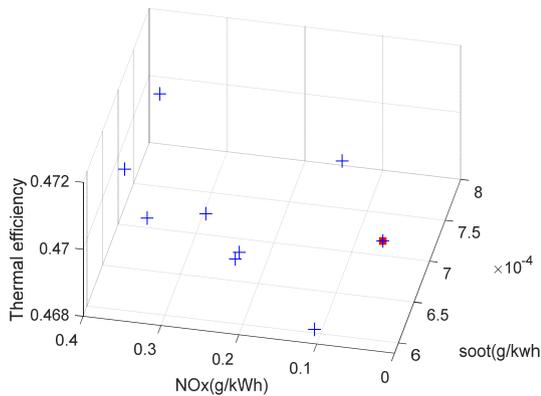


Fig. 10. Pareto front and its solution set

서 1의 범위로 무차원하는 것이 필요하다. 정규화 함수는 다음과 같다.

$$f(X) = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

여기서 $f(X)$ 는 정규화 함수이고, x_{\max} , x_{\min} 은 도메인 내 파라미터의 최대값과 최소값이며, x 는 도메인 내의 모든 방출 파라미터 값이다.

3개의 목표변수에서 열효율은 40%, NOx는 50%, soot는 10%의 가중치를 두어 [0,1]로 정규화된 각 목표 변수들의 합을 구하였다. soot는 상대적으로 적게 배출되어 가중치를 가장 낮게 설정하였다. 가중치를 고려하여 합산한 결과, 가장 최소값을 갖는 최적해를 최종적으로 선택하였는데, Fig. 10에서 빨간 원형점으로 표시된 지점이다. 최종 선택된 최적해는 저반응성연료비율은 0.68, 이단 분사 시 첫 번째 연료분사시기는 -56°ATDC, 두 번째 연료분사시기는 -26°ATDC, 이단 분사 시 첫 번째 분사량 비율은 0.4의 조건이며, 이 때 얻은 연소성능은 열효율 0.47, NOx는 0.054g/kWh, soot는 0.00072g/kWh이다.

Table 5. The optimization results

Low reactive fuel ratio	0.69
Diesel first injection timing	-56
Diesel second injection timing	-26
Diesel first injection ratio	0.4
Thermal efficiency	0.47
NOx(g/kWh)	0.054
soot(g/kWh)	0.00072

상기 결과는 1300rpm, 6bar 조건에서 얻어진 결과이며, 엔진 전체 매핑을 위해서는 엔진회전수와 부하로 구성된 전체 조건에서 동일한 작업을 수행하여야 한다. 이러한 시뮬레이션을 과정을 통해 실제 엔진 매핑 시험의 시간 및 비용을 크게 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 저반응성 연료로는 가솔린을 사용하고 고반응성 연료로는 디젤을 사용하는 RCCI 엔진에서 다목적 유전자 알고리즘을 도입하여 연소성능 최적화를 위한 수치해석을 수행하였다. 여러 연소성능 지표 중에 열효율과 배출가스 NOx와 soot를 3가지 목표변수로 선정하고, 이에 영향을 미치는 연료분사 매개변수들로서 저반응성연료비율, 디젤 이단 분사 시 첫 번째 연료분사시기, 두 번째 연료분사시기, 이단 분사 시 첫 번째 분사량 비율의 4가지를 작동매개변수로 선정하여 다목적 최적화 설계 방법인 비지배 정렬 유전 알고리즘 II(NSGA-II)을 적용하여 연소성능 최적화 조건을 구하고자 하였으며, 해석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) NSGA-II를 이용한 방법이 RCCI엔진의 연소성능 최적화에 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다.
- 2) 최적화 과정을 수행한 결과, 1300rpm, 6bar 조건에서 저반응성연료비율은 0.68, 이단 분사 시 첫 번째 연료분사시기는 -56°ATDC, 두 번째 연료분사시기는 -26°ATDC, 이단 분사 시 분사량 비율은 0.4의 조건으로 운전 시 열효율 0.47, NOx는 0.054g/kWh, soot는 0.00072g/kWh의 결과를 얻었다.
- 3) 최적화 시뮬레이션 과정을 통해 실제 엔진 매핑 시험 시간 및 비용을 크게 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] A. Joshi, "Review of vehicle engine efficiency and emissions", SAE Technical Paper 2020-01-0352, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4271/2020-01-0352>
- [2] K. Epping, S. Aceves, R. Bechtold, J. Dec, "The potential of HCCI combustion for high efficiency and low emissions", SAE Technical Paper 2002-01-1923, 2002. DOI: <https://doi.org/10.4271/2002-01-1923>

- [3] S. K. Gupta, A. Krishnasamy, "Experimental investigations to extend the load range of premixed charge compression ignited light duty diesel engine through fuel modifications", SAE Technical Paper 2019-01-0953, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2019-01-0953>
- [4] S. L. Kokjohn, R. M. Hanson, D. A. Splitter, R. D. Reitz, "Experiments and modeling of dual-fuel HCCI and PCCI combustion using in-cylinder fuel blending", SAE Technical Paper 2009-01-2647, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2009-01-2647>
- [5] R. M. Hanson, S. L. Kokjohn, D. A. Splitter, R. D. Reitz, "An experimental investigation of fuel reactivity controlled PCCI combustion in a heavy-duty engine", SAE Technical Paper 2010-01-0864, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2010-01-0864>
- [6] K. V. Pudukkamm, L. Liang, C. V. Naik, E. Meeks, S. L. Kokjohn, R. D. Reitz, "Use of detailed kinetics and advanced chemistry solution techniques in CFD to investigate dual-fuel engine concepts", SAE Technical Paper 2011-01-0895, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2011-01-0895>
- [7] R. D. Reitz, G. Duraisamy, "Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition(RCCI) combustion in internal combustion engines", Progress in Energy and Combustion Science 46, pp.12-71, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.05.003>
- [8] P. N. S. Ram, A. Krishnasamy, "Experimental investigations on the effects of multiple injections in reactivity-controlled compression ignition in a light-duty engine operated with gasoline/diesel", SAE Technical Paper 2020-01-5072, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2020-01-5072>
- [9] Y. Sun, R. D. Reitz, "Modeling diesel engine NOx and soot reduction with optimized two-stage combustion", SAE Technical Paper 2006-01-0027, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2006-01-0027>
- [10] A. B. Dempsey, P. Seiler, K. Svensson, "A Comprehensive Evaluation of Diesel Engine CFD Modeling Predictions Using a Semi-Empirical Soot Model over a Broad Range of Diesel Combustion Systems", SAE International Journal of Engines 2018-01-0242, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-0242>

함 윤 영(Yun-Young Ham)

[정회원]



- 1988년 8월 : 연세대학교 연세대학원 기계공학과 (기계공학석사)
- 1996년 8월 : 연세대학교 연세대학원 기계공학과 (기계공학박사)
- 1989년 11월 ~ 2001년 1월 : 대우자동차 기술연구소 책임연구원
- 2001년 3월 ~ 현재 : 우석대학교 기계자동차공학과 교수

<관심분야>

엔진제어, 친환경자동차

장 효 정(Xiaojing Zhang)

[정회원]



- 2010년 9월 : Langfang Normal University, School of Chemistry and Material Science (학사)
- 2014년 9월 : University of Science and Technology Beijing, School of Civil and Resource Engineering (공학석사)
- 2022년 8월 : 우석대학교 기계자동차공학과 (공학박사)
- 2023년 1월 ~ 현재 : 중국 한단대학교 기계전기공학부 교수

<관심분야>

내연기관, 열유체공학