

유전알고리즘을 이용한 대형 디젤 엔진 운전 조건 최적화

김 만 식* · Mike P. Liechty · Rolf D. Reitz

Engine Research Center, University of Wisconsin-Madison

Optimization of Heavy-Duty Diesel Engine Operating Parameters Using Micro-Genetic Algorithms

Manshik Kim* · Mike P. Liechty · Rolf D. Reitz

Engine Research Center, University of Wisconsin-Madison, 1500 Engineering Drive, Madison, Wisconsin 53706, USA
(Received 6 September 2004 / Accepted 6 December 2004)

Abstract : In this paper, optimized operating parameters were found using multi-dimensional engine simulation software (KIVA-3V) and micro-genetic algorithm for heavy duty diesel engine. The engine operating condition considered was at 1,737 rev/min and 57 % load. Engine simulation model was validated using an engine equipped with a high pressure electronic unit injector (HEUI) system. Three important parameters were used for the optimization - boost pressure, EGR rate and start of injection timing. Numerical optimization identified HCCI-like combustion characteristics showing significant improvements for the soot and NO_x emissions. The optimized soot and NO_x emissions were reduced to 0.005 g/kW-hr and 1.33 g/kW-hr, respectively. Moreover, the optimum results met EPA 2007 mandates at the operating point considered.

Key words : Optimization(최적화), Micro genetic algorithm(미세유전알고리즘), KIVA-3V code(KIVA-3V 코드), Diesel engine(디젤엔진)

Nomenclature

ATDC	: after top dead center
BSFC	: brake specific fuel consumption, g/kW-hr
BTDC	: before top dead center
EVO	: exhaust valve open
IVC	: intake valve close
μGA	: micro genetic algorithm
SOI	: start of injection

1. 서론

진 세계적으로 환경문제에 대한 관심이 증대되고

배기 규제가 강화됨에 따라 최근의 디젤엔진 관련 연구는 연료 경제성의 손실 없이 Soot 과 NO_x 를 줄이는데 초점을 맞추고 있다. 다양한 후처리 방법을 적용하여 유해 배출물을 저감시키는 방안과 함께 디젤엔진 연소 시스템의 최적화를 이끌어 내기 위한 노력이 계속 진행중이다. 고압 분사 시스템의 개발 및 다양한 연소 방식의 적용이 그 예가 될 수 있다. 실험에 많은 부분을 의존한 과거의 접근 방법에 비해 최근 들어 컴퓨터의 성능이 크게 향상됨에 따라 엔진 설계 단계부터 CFD 기법을 적용하는 사례가 늘고 있다. 특히 디젤엔진 연소는 다양한 운전 인자와 분무 특성이 서로 영향을 미치기 때문에 실험적으로는 각 인자의 독립적인 영향을 파악하기가 어려운 점이 있다. 이에 따라 개발비용 및 기간을 단

*To whom correspondence should be addressed.
manshik@erc.wisc.edu

축시키기 위한 방안으로 최적화 알고리즘을 적용한 연구가 진행되고 있으며 그 중 하나로 자연의 진화 과정을 모사한 유전알고리즘이 널리 적용되고 있다. 다른 최적화 알고리즘과 달리 유전알고리즘은 해 영역을 전역적으로 탐색하는 특징이 있다.¹⁾ 국내외로 유전알고리즘을 자동차 연구 분야에 적용한 사례들이 보고되고 있는데,²⁻⁴⁾ Wickman 등³⁾은 대형 엔진과 고속 직분식 엔진의 연소실 형상과 운전 조건을 최적화하는데 유전 알고리즘을 적용하여 CFD 해석의 장점을 부각시켰다.

본 연구에서는 미세유전알고리즘과 엔진 연소 해석에 널리 사용되는 KIVA-3V 코드⁵⁾를 결합하여 수치적으로 해석 대상 엔진의 운전 인자를 최적화하고자 하였다. KIVA-3V의 해석 모델들에서 사용되는 각종 계수는 실험을 통해 수정하여 사용하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 엔진 연소해석 모델 및 해석 방법

해석 대상 엔진 연소실 내부에서의 연료 분사, 연소 과정 및 배출물 특성을 해석하기 위해서 Engine Research Center (UW-Madison)에서 수정, 보완한 분무, 점화, 연소 모델을 KIVA-3V에 적용하여 사용하였다. 인젝터에서 분사된 분무 액적의 미립화 모델로는 KH-RT 모델⁶⁾을 사용하였고 자발화 과정 및 연소 과정은 각각 Shell 모델과 난류특성시간 모델을 사용하였다.⁷⁾ Soot의 생성 및 산화 모델은 각각 Hiroyasu⁸⁾와 Nagle and Strickland-Constable⁹⁾ 모델을 사용하였으며 NOx 모델로는 확장 Zel'dovich 메커니즘¹⁰⁾을 사용하였다. 다음 장에서 설명할 기본 엔진 실험을 통해 자발화 시점 및 확산연소 과정의 모사에 적용되는 모델 계수를 수정하였으며 수정된 모델 계수는 최적화 계산 동안 고정하여 사용하였다. 본 연구에 사용된 엔진은 배기량 2.44 리터의 직접분사식 단기통 디젤엔진으로써 고압 유닛 인젝터를 장착한 엔진이다. 최적화 계산은 1,737 rev/min, 57 % 부하 조건 (Mode 5)에서 수행되었다. 기본 사양의 인젝터는 6개의 직경 0.158 mm 분공을 가지고 있다. 해석은 밸브가 닫혀 있는 구간 (IVC-EVO)에서만 수행하였으며 분공의 수가 6 개임을 감안하여 한 개의 분공에 해당하는 60° 섹터 격자를 구성하여

해석하였다. 디젤연료와 성질이 유사한 C₁₄H₃₀을 연료로 사용하였으며 분사율은 Mode 5 조건에서 분사율 측정장치로 측정된 값을 이용하였다. 또한 흡배기과정 중의 일 손실은 본 연구실에서 측정된 데이터로부터 구한 실험식을 사용하였다.¹¹⁾ Fig. 1에 BTDC 30°에서의 해석 격자를 나타내었다. Table 1에는 계산 및 실험에 사용된 엔진과 인젝터의 사양을 나타내었다.

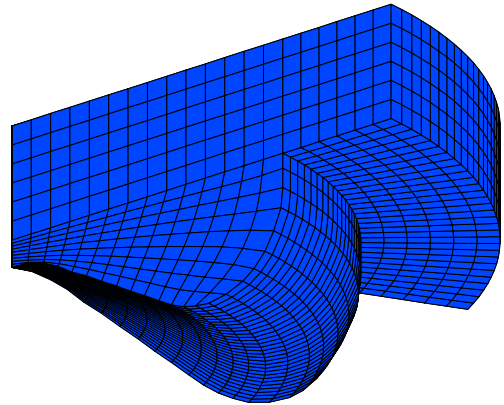


Fig. 1 Computational grid for the Caterpillar engine at BTDC 30°

Table 1 Specifications of heavy duty diesel engine and injector

Engine	Caterpillar 3401 SCOTE
Bore (mm) × Stroke (mm)	137.2 × 165.1
Compression ratio	16.1:1
Displacement volume (ℓ)	2.44
Piston geometry	Mexican hat
Number of holes	6
Diameter of hole (mm)	0.158
Injection angle (deg.)	128
Injected mass (mg)	132.2

2.2 미세 유전알고리즘

본 연구에서는 Senecal 등²⁾이 사용한 μGA (Micro genetic algorithm)를 사용하였다. 자연의 진화 과정을 모사하여 세대가 진행되며 유전적으로 우월한 염색체를 가지는 개체가 살아남는 적자생존의 이론을 기본 개념으로 사용한다. 이를 컴퓨터 상에서 구현하기 위해서 0과 1로 구성된 이진 코드가 염색체

와 유사한 개념으로 사용되며 본 연구에서 이진 코드는 엔진 운전 조건 인자의 조합을 나타낸다. μGA 에서는 보통 한 세대에서 5 개의 개체를 사용하는 데 보통 1 개의 개체는 전 세대에서 가장 우월한 개체가 전달되는 엘리트 보전 선택법(Elitist preserving selection)을 적용하여 전달되기 때문에 나머지 4 개의 개체에 해당하는 운전 조건을 4 개의 CPU 를 사용하여 병렬계산을 수행한다. 각 개체의 적합도를 판정하는 최적화 목적함수는 다음과 같이 정의하여 사용하였다.

$$F(X) = \frac{1000}{\left(\frac{NOx+HC}{(NOx+HC)_o}\right)^2 + \left(\frac{PM}{PM_o}\right)^2 + \frac{BSFC}{BSFC_o}} \quad (1)$$

NOx 와 Soot 의 경우는 제공된 항을 사용하여 저감에 따른 효과가 크도록 하였다. 아래첨자 o 는 최적화의 목표값을 나타내며 본 연구에서는 EPA 2007 규정의 값을 사용하였다.¹²⁾ ($PM : 0.0134 \text{ g/kW-hr}$, $NOx + HC : 1.796 \text{ g/kW-hr}$, $BSFC : 256 \text{ g/kW-hr}$) 또한 최대압력과 압력 상승률이 정해진 값보다 큰 경우, 목적함수의 값에 손실이 있도록 벌칙함수를 부가하였다. 한 세대의 계산이 종료되면 토너먼트 선택법(Tournament selection)을 사용하여 다음 세대를 구성할 부모를 지정하고 교차연산(Crossover)을 사용하여 개체를 생성한다. 이와 같은 과정을 정해진 수렴 조건에 다다를 때까지 세대를 걸쳐 계산하게 된다. 본 연구에서는 부스트 압력, EGR율 및 분사시작 각도를 최적화의 인자로 사용하였으며 Table 2 에 각 인자의 변화 범위를 나타내었다.

Table 2 Variation of engine operating parameters

Boost pressure (kPa)	130 ~ 220, 4 steps
EGR rate (%)	0.0 ~ 50.0, 32 steps
SOI timing (ATDC deg.)	-60.0 ~ 20.0, 32 steps

3. 실험장치 및 실험방법

Fig. 2 에 KIVA-3V 코드의 모델 검증을 위한 실험장치를 나타내었다. EGR 은 별도의 펌프를 사용하여 50 % 까지 구현할 수 있도록 하였으며 추후에 실험적으로도 유전알고리즘을 구현할 수 있도록 자동

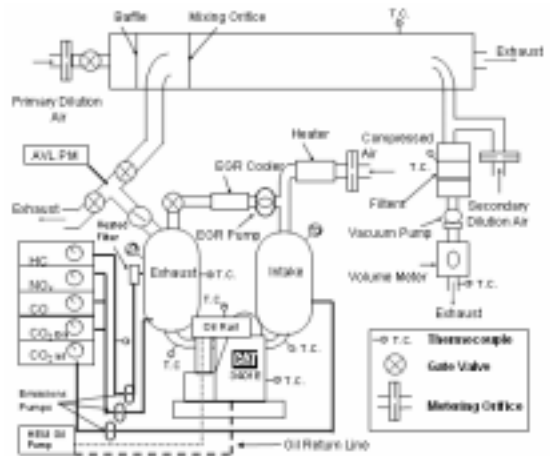


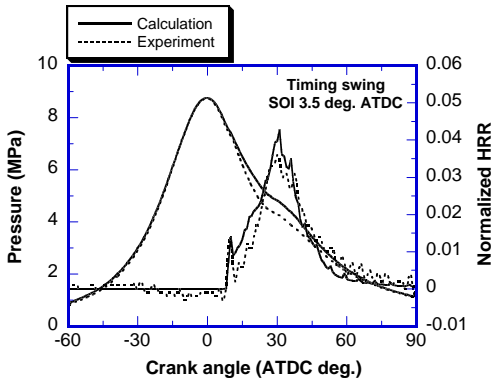
Fig. 2 Engine laboratory setup with dilution tunnel and EGR system

화된 시스템을 구성하였다. 또한 해석 코드의 검증과 추후에 실험적으로도 최적화 목적함수값을 구할 수 있도록 Soot, HC, NOx 등의 배기가스를 측정하였다. 해석 모델의 검증을 위해서 EGR 율을 0 % 로 고정하고 분사 시작 시기를 -3.5° ATDC 에서 5.5° ATDC 까지 2° CA 간격으로 변화시킨 실험과 분사 시작시기를 -5.5° ATDC 로 고정하고 EGR 율을 0 % ~ 23.5 % 로 변화시킨 실험을 수행하였다.

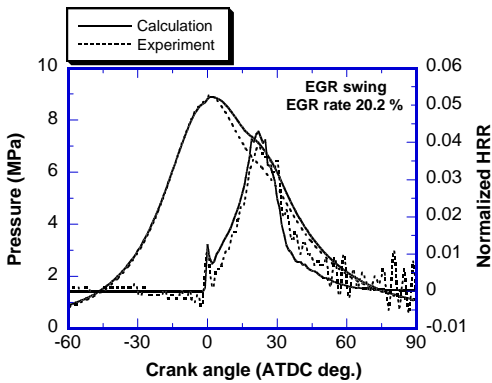
4. 결과 및 검토

4.1 모델 검증 해석 결과

Fig. 3 에 실험 결과와 비교한 연소실 압력과 분사량과 연료의 발열량과의 곱의 값으로 정규화된 열발생률 계산 결과를 나타내었다. Fig. 3(a)와 3(b)에 각각 분사시작시기를 변화시킨 경우와 EGR 율을 변화시킨 경우의 대표적인 예만을 나타내었다. 비교적 정확하게 연소 특성과 열발생률을 예측하는 것을 확인할 수 있다. 특히 모델 검증을 위한 실험에서 초기 에혼합연소와 뒤이어 이어지는 확산연소를 동시에 잘 예측하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4 에는 배기가스 배출 특성을 실험과 비교하여 나타내었다. 절대적인 값에서 차이를 보이기는 하지만 비교적 정확히 Soot 과 NOx 배출 특성을 예측하는 것을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 3 Cylinder pressure and heat release rate comparison between the experiment and calculation

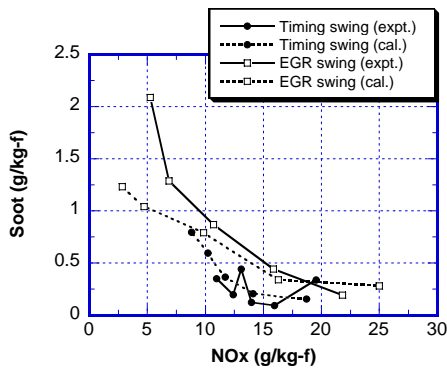


Fig. 4 Comparison of emission characteristics

4.2 운전 조건 최적화 결과

Fig. 5에 각 세대에 따른 목적함수의 값의 변화를

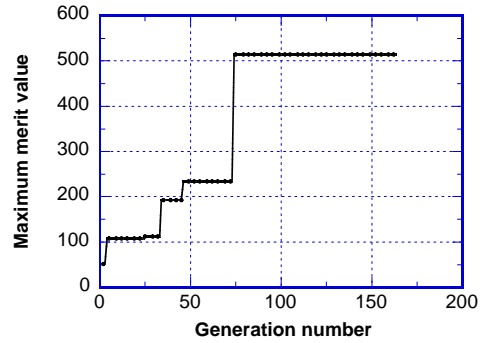


Fig. 5 Mode 5 three-factor GA merit vs. generation

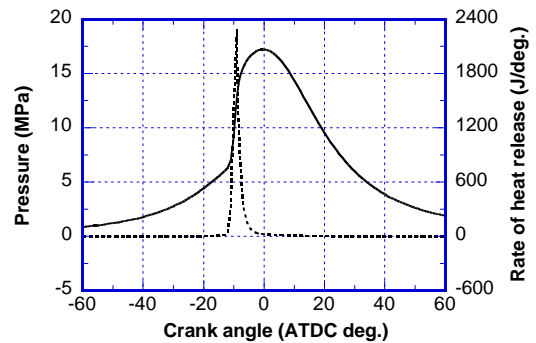


Fig. 6 Cylinder pressure and heat release rate of the optimum case

나타내었다. 초기 세대에 비해 5 차례 정도의 증가가 있었으며 74 번째 세대 이후에는 최대 목적함수 값에 변화가 없는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 74 번째 세대의 결과를 최적화된 운전 조건으로 판단하고 그 결과를 분석하였다. 최적화된 운전 조건은 각각 부스트 압력 220 kPa, EGR 율 46.6%, 분사시작각도 -60° ATDC 였다. Fig. 6에 최적화된 운전조건에서의 연소실 압력과 열발생률을 나타내었다. 분사시작시기가 상당히 진각됨에 따라 확산연소의 특성은 줄어들고 예혼합연소의 특성이 크게 나타남을 볼 수 있다. 이에 따라 Soot의 배출이 상당히 저감되었으며 특히 EGR이 다량 사용됨에 따라 NOx도 동시에 저감되는 특성을 나타내었다 (Soot : 0.005 g/kW-hr, NOx + HC : 1.33 g/kW-hr). Fig. 7에 해석한 모든 경우의 (a) NOx + HC - Soot, (b) NOx + HC - BSFC 결과와 각 단계별의 최대목적함

수값을 나타내었다. 각 그래프에서 점선은 EPA 2007 규정치를 나타내며 세대가 진행될수록 점차로 원점 근처로 이동하는 경향을 확인할 수 있다. 운전 인자를 살펴보면 NOx 를 저감시키기 위해 EGR 율이 증가하는 방향으로 이동하였으며 NOx 와 Soot 의 동시 저감을 위해 HCCI 연소와 유사하도록 분사 시작시기가 -60° ATDC 까지 진작되었다. Fig. 8에 최적 운전조건에서의 혼합기 형성 결과를 나타내었다. -60° ATDC 에서 분사가 시작된 후 약 -27° ATDC 에는 분사된 액적이 주로 존재하는 부분을 제외하고는 연소실 보울 내부에 균일하게 혼합기가 형성되는 것을 볼 수 있다. 분사압력은 약 150 MPa 로 고정되어 있으나 연소실 보어의 크기가 큰 대형 디젤 엔진이므로 조기 분사에 따른 연소실 벽면에 액적이 충돌하는 현상은 관측되지 않았다.

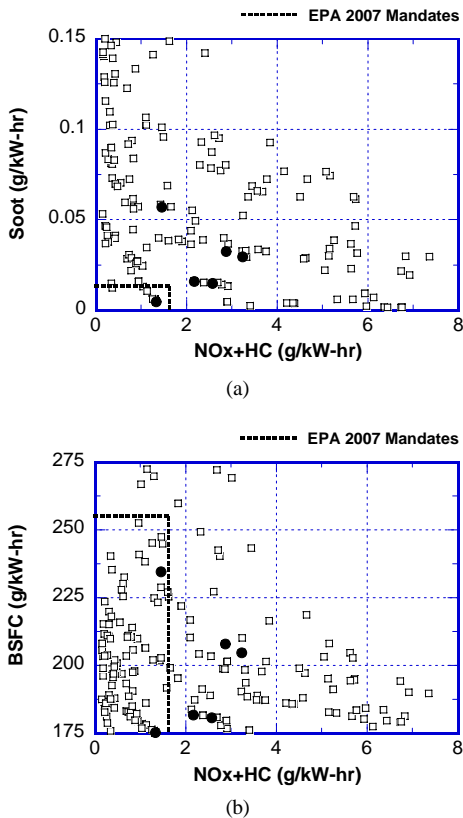


Fig. 7 (a) Soot vs. NOx + HC (b) BSFC vs. NOx + HC data from the optimization study including the optimization start point, intermediate optimum and global optimum (not all points are shown due to scaling)

Fig. 9 ~ Fig. 11에 연소가 시작된 이후 인젝터 중심축을 포함하는 평면에서의 온도 분포, NOx 및

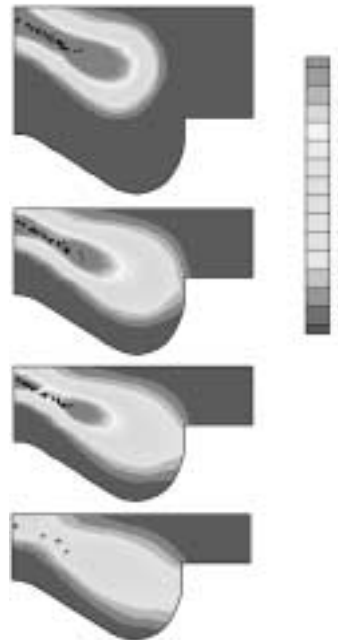


Fig. 8 Predicted fuel vapor concentration for the optimum case (-40° ATDC, -30° ATDC, -27° ATDC and -24° ATDC from top to bottom)

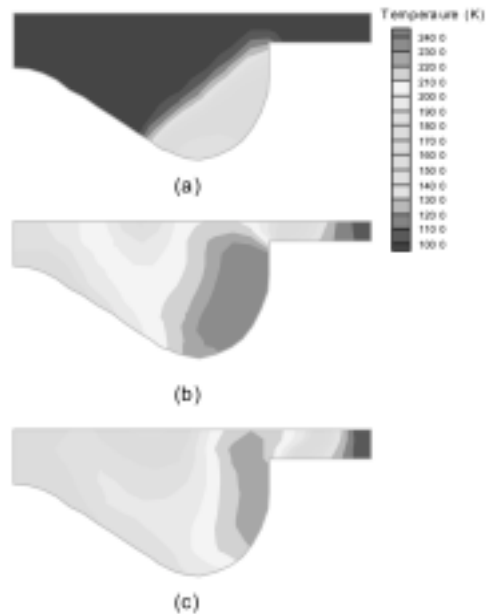


Fig. 9 In cylinder temperature distribution at (a) -10° ATDC (b) TDC (c) 10° ATDC

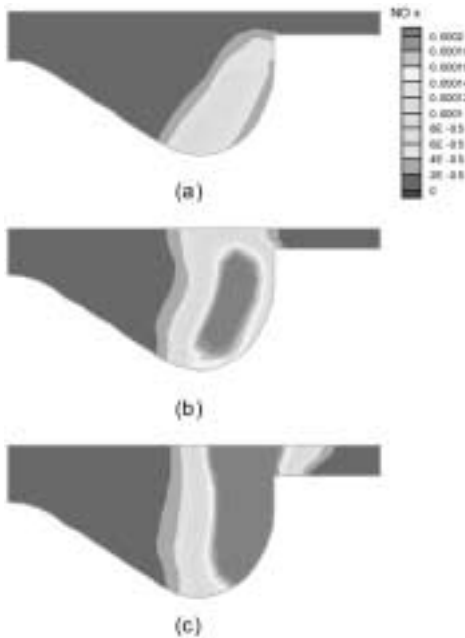


Fig. 10 In cylinder NOx distribution at (a) -5° ATDC (b) TDC (c) 10° ATDC

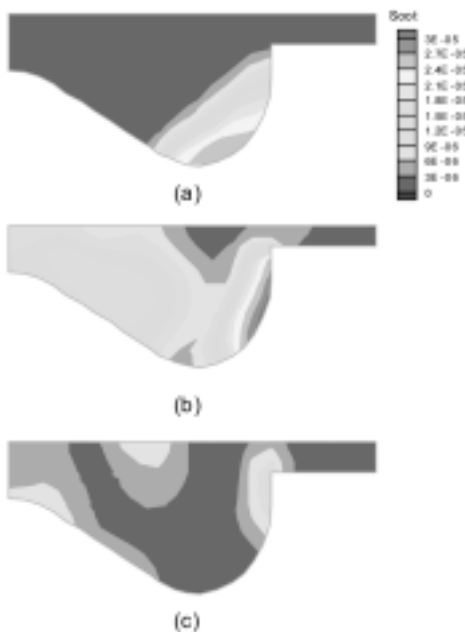


Fig. 11 In cylinder soot distribution at (a) -10° ATDC (b) TDC (c) 10° ATDC

Soot 형성 특성을 나타내었다. 보울의 바깥쪽에서부터 온도 상승이 관찰되며 연소실 내부 전체 영역에

서 급격한 온도 상승이 일어난다. NOx 가 생성되는 영역은 온도 분포의 그림과 비슷하게 고온 영역에서 주로 생성되며 Soot 의 경우, 보울 바깥쪽 근처에서 먼저 생성되나 전체적으로 균일하게 혼합기가 형성되었기 때문에 국소적으로 연료가 농후한 지역이 적어 급격하게 Soot 의 산화가 진행됨을 볼 수 있다. 그러나 급격한 압력의 상승으로 인해 연소 노이즈가 큰 문제로 대두될 것임을 예측할 수 있다. 최적 운전 조건의 경우에는 벌칙함수에 의해 목적함수값에 손실이 있음에도 불구하고 Soot 과 NOx 의 동시 저감이 가능한 HCCI 와 유사한 연소 특징으로 인해 목적함수값을 크게 예측하였다. 이에 대한 대안으로는 전 단계의 최적점인 46 번째 세대의 최적 운전 조건을 최적점으로 결정하는 방법을 고려할 수도 있다. 46 번째 세대의 최적 운전 조건은 74 번째 세대의 최적 운전 조건에 비해 부스트 압력이 190 kPa 로 감소되고 분사시기가 약 -52° ATDC 로 지각됨에 따라 최대압력은 약 16 MPa 로 감소되었다. μ GA 를 실제 엔진에 적용하기 위해서는 넓은 범위의 운전 조건에서 엔진 성능 및 배출물 특성을 잘 예측하는 모델의 정확성이 요구되며 특히 목적함수의 형태에 따라 최적화의 방향이 결정될 수 있기 때문에 최적화하려는 대상이나 조건에 맞게 이에 대한 고려도 필요할 것으로 사료된다.

5. 결론

대형 디젤엔진의 운전 조건을 최적화하기 위해 모델의 검증 실험과 μ GA 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실험 결과를 이용하여 모델 계수를 조정된 KIVA-3V 코드와 μ GA 기법을 결합하여 디젤 엔진 운전 조건을 최적화하는 도구로써 유용하게 활용될 수 있음을 보였다.
- 2) 본 연구에서 수행한 1,737 rev/min, 57 % 부하 조건에서의 최적화 운전 조건은 부스트 압력 220 kPa, EGR 율 46.6 %, 분사시작각도 -60° ATDC 였 으며 HCCI 엔진과 유사한 예혼합연소 특성을 보였다.
- 3) 해석을 통해 찾아진 최적점에서의 Soot 의 배출

량은 0.005 g/kW-hr, NO_x의 배출량은 1.33 g/kW-hr 로 저감되었다.

- 4) 연소 노이즈가 문제가 될 수 있다면 목적함수의 제약조건을 엄하게 정하여 해석을 수행할 수 있다. 그러나 해석을 통해서 찾아진 중간 단계의 최적점들도 검토를 통해 최적점이라고 판단할 수 있다.

후 기

본 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원에 의하여 연구되었음.

References

- 1) D. E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.
- 2) P. K. Senecal and R. D. Reitz, "Simultaneous Reduction of Engine Emissions and Fuel Consumption Using Genetic Algorithms and Multi-Dimensional Spray and Combustion Modeling," SAE 2000-01-1890, 2000.
- 3) D. D. Wickman, H. Yun and R. D. Reitz, "Split-Spray Piston Geometry Optimized for HSDI Diesel Engine Combustion," SAE 2003-01-0348, 2003.
- 4) T. S. Kim, D. H. Lee and J. J. Kim, "Optimum Design of Suspension Systems Using a Genetic Algorithm," Transactions of the KSAE, Vol.8, No.5, pp.138-147, 2000.
- 5) A. A. Amsden, "KIVA-3V : A Block-Structured KIVA Program for Engines with Vertical or Canted Valves, Los Alamos National Laboratory Report No. LA-1333-MS, 1997.
- 6) M. A. Patterson and R. D. Reitz, "Modeling the Effects of Fuel Spray Characteristics on Diesel Engine Combustion and Emissions," SAE 980131, 1998.
- 7) S. C. Kong, Z. Han and R. D. Reitz, "The Development and Application of a Diesel Ignition and Combustion Model for Multidimensional Engine Simulations," SAE 950278, 1995.
- 8) K. Nishida and H. Hiroyasu, "Simplified Three-Dimensional Modeling of Mixture Formation and Combustion in a D. I. Diesel Engine," SAE 890269, 1989.
- 9) J. Nagle and R. F. Strickland-Constable, "Oxidation of Carbon between 1000-2000 °C," Proc. of the Fifth Carbon Conf., Vol.1, p.154, 1962.
- 10) C. T. Bowman, "Kinetics of Pollutant Formation and Destruction in Combustion," Progress of Energy Combustion Science, Vol.1, pp.33-45, 1975.
- 11) D. D. Wickman, "HSDI Diesel Engine Combustion Chamber Geometry Optimization," Ph. D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, 2003.
- 12) Emission Standards: USA Heavy-Duty Truck and Bus Engines: <http://www.dieselnets.com/standards/us/hd.html>