

## 유전알고리즘을 이용한 디젤엔진의 연소최적화 기법에 대한 연구

김 동 광<sup>1)</sup> · 조 남 효<sup>\*1)</sup> · 차 순 창<sup>2)</sup> · 조 순 호<sup>2)</sup>

고등기술연구원<sup>1)</sup> · 대우중합기계(주)<sup>2)</sup>

### An Optimization Technique for Diesel Engine Combustion Using a Micro Genetic Algorithm

Dong-Kwang Kim<sup>1)</sup> · Nam-Hyo Cho<sup>\*1)</sup> · Soon-Chang Cha<sup>2)</sup> · Soon-Ho Cho<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Institute for Advanced Engineering, 633-2 Goan-ri, Baegam-myeon, Yongin-si 449-863, Korea

<sup>2)</sup>Daewoo Heavy Industries & Machinery, 7-11 Hwasu-dong, Dong-gu, Incheon 401-020, Korea

(Received 6 November 2003 / Accepted 22 March 2004)

**Abstract** : Optimization of engine design and operation parameters using a genetic algorithm was demonstrated for direct injection diesel engine combustion. A micro genetic algorithm and a modified KIVA-3V code were used for the analysis and optimization of the engine combustion. At each generation of the optimization step the micro genetic algorithm generated five groups of parameter sets, and the five cases of KIVA-3V analysis were to be performed either in series or in parallel. The micro genetic algorithm code was also parallelized by using MPI programming, and a multi-CPU parallel supercomputer was used to speed up the optimization process by four times. An example case for a fixed engine speed was performed with six parameters of intake swirl ratio, compression ratio, fuel injection included angle, injector hole number, SOI, and injection duration. A simultaneous optimization technique for the whole range of engine speeds would be suggested for further studies.

**Key words** : Micro genetic algorithm(μGA: 미세유전알고리즘), Optimization(최적화), Combustion(연소), Diesel Engine(디젤엔진), KIVA-3V code(KIVA-3V코드)

#### Nomenclature

SGA : simple genetic algorithm  
μGA : micro genetic algorithm  
CFD : computational fluid dynamics  
MPI : message passing interface  
IVC : intake valve close  
EVO : exhaust valve open  
BSFC : break specific fuel consumption  
SOI : start of injection

#### 1. 서론

디젤엔진의 배기규제가 더욱 엄격해 지고 고효율 엔진에 대한 요구가 커지고 있어서 이에 대응하는 엔진을 적기에 개발하기 위해서는 엔진 연소시스템의 최적화 설계가 중요한 개발단계중의 하나가 되고 있다. 과거에는 이러한 최적화가 대부분 시험에 의존하여 왔으나 CFD 기법의 발달과 컴퓨터 계산능력의 비약적인 향상으로 엔진 연소 최적화에 CFD의 활용도가 높아지고 있다. 엔진 연소에는 다양한 설계 및 운전 인자들이 서로 영향을 미치므로 그 최적화 과정이 쉽지 않기 때문에 개발 비용과 기

\*To whom correspondence should be addressed.  
nhcho@iae.re.kr

간을 단축하려는 시도로써 여러 가지 최적화 알고리즘을 사용한 연구들이 활발히 수행되고 있다. 특히 유전알고리즘의 사용이 점차 증가하고 있다. 유전알고리즘은 자연세계의 진화과정에 기초한 계산 모델로서 1970년대 John Holland에 의해서 개발된 최적화 알고리즘이다.<sup>1)</sup> 이것은 자연 선택의 원리와 자연계의 생물 유전학에 기본 이론을 두며 병렬적이고 전역적(全域的)인 탐색 알고리즘으로써, 모든 생물은 주어진 다양한 환경 속에 적응함으로써 살아 남는다는 Darwin의 적자생존의 이론을 기본 개념으로 한다.

유전알고리즘은 설계 최적화 분야에서 성공적으로 적용되고 있다. 대표적으로 Carroll<sup>2,3)</sup>은 레이저 시스템 설계에, Coello Coello<sup>4)</sup>은 콘크리트 빔 설계에 유전알고리즘을 적용한 바 있다. 국내 자동차 연구 분야에서도 유전알고리즘의 적용사례가 다수 보고 되고 있는데 에어백 전개 알고리즘,<sup>5)</sup> 현가장치의 설계,<sup>6)</sup> 브레이크 패드의 위상최적화<sup>7)</sup> 등 차량 부품 설계에 다양하게 적용되고 있다. 엔진 연소시스템의 최적설계에서도 유전알고리즘이 활용되고 있는데 국내에서는 사례가 흔치 않다. Edward 등<sup>8)</sup>은 엔진의 최적화를 위하여 요인실험 (Factorial experiment)을 수행하여 수학적 모델을 만들고 이를 유전알고리즘을 사용하여 최적화 하였다. Senecal 등<sup>9)</sup>은 6개의 엔진 인자를 최적화 하는데 유전알고리즘을 적용하였다. Wickman 등<sup>10)</sup>은 트럭엔진과 고속 직접 분사식 소형 엔진의 형상과 엔진 인자를 최적화하는데 유전알고리즘을 적용하였으며 Shrivastava 등<sup>11)</sup>은 8개의 엔진 인자를 최적화 하는데 유전알고리즘을 적용하였다. Thiel 등<sup>12)</sup>은 실험을 통하여 최적화를 수행하였는데 RSM (Response Surface Method)와 유전알고리즘 모두 유사한 최적화 결과가 나왔다고 보고하였다. Hiroyasu 등<sup>13)</sup>은 디젤엔진의 다목적 최적화 문제에서 NCGA(Neighborhood Cultivation Genetic Algorithm)를 적용하여 엔진 인자를 최적화 하였다.

본 연구에서는 최근 엔진 연소해석 등에서 사용이 늘고 있는 미세유전알고리즘을 엔진 연소해석 전용 코드인 KIVA-3V코드<sup>14)</sup>에 적용하여 수치해석적 디젤엔진의 연소최적화를 시도하였다. 다음에서

미세유전알고리즘에 대한 설명과 직접분사식 대형 디젤엔진에서의 연소해석 및 설계, 운전 인자의 최적화 사례를 설명하였다.

## 2. 해석 기법

### 2.1 미세유전알고리즘

본 연구에서 사용된 유전알고리즘은 Carrol이 개발한 알고리즘과 공개된 Fortran 소스 코드를 사용하였으며<sup>15)</sup> Senecal 등이 엔진 연소최적화에 사용한  $\mu$ GA 방법과 유사한 방법이다.  $\mu$ GA의 특징은 일반적인 방법인 SGA와 비교할 때 개체군, 즉 설계인자들의 조합으로 이루어진 해석 경우의 수가 작다는 점이다. 보통 SGA에서는 개체군을 이루는 개체의 수는 30~200개 정도를 많이 사용하는데  $\mu$ GA에서는 주로 5개를 많이 사용한다. 또한  $\mu$ GA는 재생을 위한 여러 가지의 개체 선택 방법 중 엘리트 보전 선택법 (Elitist preserving selection)과 토너먼트 선택법 (Tournament selection)을 사용하는 특징이 있다. 엘리트 보전 선택법은 확률에 따라 개체를 선택하여 교배 및 돌연변이의 결과로 특별히 좋은 해가 소실되는 것을 방지하기 위해 가장 좋은 해를 보존하여 다음 세대에 남기는 방법이다. 이것은 일반적으로 다른 선택법과 융합하여 사용한다. 토너먼트 선택법은 개체군에서 일정 개수의 개체를 임의로 선택하여 그 중에서 최고의 적합도를 가지는 개체를 다음 세대에 남기는 방법인데 다음 개체군이 다 찰 때까지 반복적으로 계속한다. 본 연구에서 사용된  $\mu$ GA의 흐름도를 간단하게 설명하면 다음과 같다.

단계1) 1세대인 경우 초기 5개의 개체(설계인자들의 조합)로 이루어진 개체군을 초기화한다. 2세대부터는 최적 적합도를 가진 개체를 제외한 4개의 개체들을 초기화한다.

단계2) 개체들 각각의 적합도(최적화 목적함수)를 계산하고 최적의 적합도를 가지는 개체는 다음 세대(새로운 개체군)로 가져간다. 현 세대의 목적함수 변화추이를 살펴보고 최적화 작업의 종료 또는 계속을 판단한다.

단계3) 다음 세대의 나머지 4개의 개체를 생성하기 위해서, 토너먼트 선택에 의해 택해진 개체에 교차연산자를 적용한다.

단계4) 다음 세대의 새로운 개체군의 수렴도를 평가한

후, 수렴시 최적의 적합도를 가지는 개체는 그대로 유지한 채 단계 1로 가고, 수렴하지 않으면 단계 2로 간다.

상기 흐름도를 좀 더 보완하여 설명하면 다음과 같다. 단계 1에서 개체의 초기화는 개체를 구성하고 있는 염색체, 즉 2진수로 표현되는 설계인자들의 각각의 자릿수 값을 무작위로 결정하는 작업이다. 단계 2에서의 최적화 작업의 종료 여부는 세대 진행에 따른 목적함수 값의 변화정도를 보고 판단한다. 단계 4에서의 개체군의 수렴도는 개체군을 이루고 있는 개체들의 염색체가 서로 얼마나 동일한가의 여부로 판단한다. 본 해석에서는 최적의 적합도를 가지는 개체와 비교하여 나머지 개체들의 염색체가 95% 이상 동일하면 수렴한 것으로 판단하였다. 단계 4에서 수렴할 경우, 최적의 개체는 유지한 채 단계1로 가서 임의의 나머지 개체 4개를 생성하여 새로운 개체군을 만들게 된다. 이러한 과정에서 다양한 개체들이 생성되기 때문에  $\mu$ GA는 SGA와는 달리 일반적으로 돌연변이 연산자 (Mutation operator)를 사용하지 않는다.

엔진 연소해석을 3차원 CFD 코드를 사용하여 수행할 경우 상당한 CPU 시간이 소용된다. 따라서 개체군의 크기가 작은  $\mu$ GA를 사용하면 SGA에 비하여 개체군을 이루는 개체의 적합도를 계산하는 시간이 크게 줄어들게 된다. 이와 같이 개체의 적합도를 CFD코드로 계산하는 데에 많은 시간이 소요되는 문제 때문에  $\mu$ GA를 사용하는 것이 SGA보다 유리하다. 또한 Krishnakumar<sup>16)</sup>와 Carroll<sup>2)</sup>은 그들의 연구에서  $\mu$ GA가 SGA보다 좀 더 적은 함수 값을 계산하여 최적점에 도달한다고 보고 하였다. 본 연구에서는 보다 빠른 계산 수행을 위하여 MPI 프로그래밍 기법을 사용하여  $\mu$ GA 코드를 병렬화하였으며 KISTI 슈퍼컴퓨팅센터의 IBM Regatta SMP 클러스터를 사용하였다. 개체수와 같은 수의 CPU를 사용하여 각 개체의 적합도를 동시에 계산하는 방식으로 병렬처리를 수행하면 4배 정도의 CPU 시간을 단축할 수 있다. CPU 시간은 연소해석시 시간간격, 격자수, 수렴도 설정 등에 크게 좌우되므로 본 해석의 사례에서는 신뢰성 있는 연소해석 결과를 줄 수 있는 최소한의 설정을 하였다.

## 2.2 엔진 연소해석 모델

엔진 연소실내의 3차원적 연료분사 및 연소 현상을 해석하기 위해 KIVA-3V 코드를 사용하였다. 분무, 점화, 연소 모델 등은 수정된 모델들을 사용하였는데 이에 대한 상세한 설명은 본 논문에서는 생략하였고 관련 참고문헌을 다음에 인용하였다. 분무 미립화 모델로는 KH-RT 모델<sup>17)</sup>을 사용하였으며 자발화 과정과 연소모델은 각각 Shell 모델과 특성시간 모델을 사용하였다.<sup>18)</sup> Soot 생성모델은 Hiroyasu의 모델<sup>19)</sup>, Soot 산화모델은 Nagle and Strickland-Constable 모델<sup>20)</sup>을 사용하였으며 NOx 모델은 확장된 Zel'dovich 모델<sup>21)</sup>을 사용하였다.

## 3. 디젤엔진의 연소최적화 사례

### 3.1 기본사양에 대한 연소 해석

본 해석에 사용된 엔진은 Table 1과 같은 사양을 가지고 있는 배기량 11리터의 6기통 직접분사식 대형디젤엔진으로써 최신의 고압 커먼레일 연료시스템을 장착한 엔진이다.

Table 2 Base engine specifications

Engine type	Common rail direct injection inline 6 cylinders
Bore	128 mm
Stroke	142 mm
Conrod length	256 mm
Compression ratio	17.5 : 1
IVO, IVC	24 BTDC, 30 ABDC
EVO, EVC	52 BBDC, 14 ATDC
Injector nozzle diameter	0.197 mm
Injector nozzle hole number	8
Injected spray included angle	146 deg.

엔진회전수는 1400 rpm 한 조건만 해석하였다. 연소해석은 밸브가 닫혀있는 구간인 IVC~EVO 구간 동안만 수행하게 되며, 해석시간을 단축하기 위해 한 개의 분공에 해당하는 45° 단면만을 계산영역으로 설정하였다.

Fig. 1은 총 12,000여 개의 요소를 사용하여 생성한 해석 격자를 보여준다. 한 가지 개체에 대한 KIVA-3V 해석에 1~1.3 CPU 시간이 소요되었으며

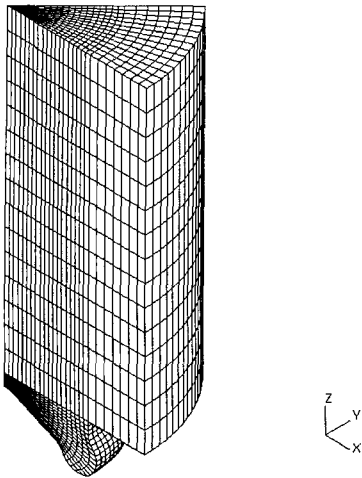


Fig. 1 Computational mesh for an 8-hole nozzle (shown the initial mesh when the piston is at BDC)

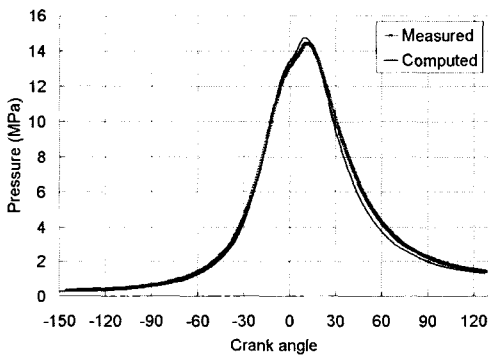


Fig. 2 Comparison of measured and computed cylinder pressure for the baseline case

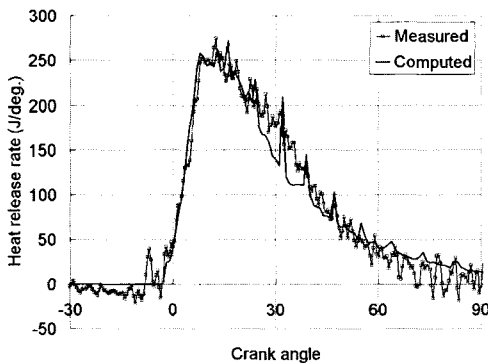


Fig. 3 Comparison of measured and computed heat release rate for the baseline case

20세대 정도에 최적화 과정이 완료되는 경우 총 24 CPU 시간이 소요된다.

Figs. 2, 3은 각각 실린더 연소압력과 열발생률을 엔진시험 결과와 비교한 결과를 나타낸다. 사용된 KIVA-3V 코드내의 여러 모델 계수를 크게 바꾸지 않고 일반 문헌에서 많이 사용되는 값들을 사용하였다. 비교적 정확하게 열발생률을 예측하고 있으며 이에 따라 연소압력도 비교적 정확한 결과를 보여주고 있는데 엔진출력은 5% 이내에서 예측이 되고 있다. Table 2의 변수값들 중 밑줄로 표시된 것과 같은 기본사양에 대한 해석 결과와 엔진시험 결과를 비교하여 모든 모델 계수를 조정 한 이후에는 이를 고정시키고 설계 인자와 운전 인자들 만을 변경 해가면서 연소최적화를 수행하게 된다.

### 3.2 연소시스템 최적화 결과

본 연구에서 사례를 든 연소시스템의 최적화 목표는 일정 엔진회전수에서 최대출력과 연료소모율을 크게 희생하지 않으면서 NOx와 Soot를 저감하는 것이다.

식 (1)은 최적화 목적함수를 나타내는데 Montgomery 등<sup>22)</sup>의 연구에서 사용한 것과 유사하게 정의하였다. 제약조건은 엔진출력이  $P_{wx}$  이상이 되도록 하는 것이었다.  $NOx_0$ ,  $Soot_0$ ,  $BSFC_0$ 는 최적화의 목표치로써 본 연구에서는 각각 5 g/kW-h, 0.03g/kW-h, 205g/kW-h를 사용하였다.  $X$ 는 최적화하고자 하는 인자들로 이루어진 벡터를 나타낸다. 사용된 목적함수에서 배기가스와 관련된 항을 제곱을 한 것은 배기가스의 영향을 목적함수에 좀 더 크게 반영하여 최적화 과정이 배기가스의 목표치에 우선적으로 향하도록 하기 위함이었다. 엔진출력에 대한 제약조건을 만족시키기 위하여 벌칙함수(Penalty function)를 적용하였다.<sup>1)</sup> 제약 최적설계 문제는 벌칙함수에 의해 복합함수로 구성되는 비제약 최적설계 문제로 변화된다.

$$F(X) = \frac{300}{\left(\frac{NOx}{NOx_0}\right)^2 + \left(\frac{Soot}{Soot_0}\right)^2 + \frac{BSFC}{BSFC_0}} \quad (1)$$

Maximize  $F(X)$   
subject to  $Power \geq P_{wx} \text{ kW}$

Table 2는 최적화 하고자 하는 인자들을 나타내는데 초기 기본사양과 최종 최적화 결과 사양을 표시하였다. 경우와 본 연구에서는 하나의 인벡터 분공

Table 2 Variation of engine operation and design parameters (the baseline case underlined, the final optimized in bracket)

SOI (CA)	-10, -9, -8, <u>-7</u> , -6, -5, -4, -3, -2, (-1), 0 (single injection)
Injection duration (CA)	20, 25, 30, (35), <u>40</u>
Swirl ratio	1.0, <u>1.1</u> , 1.2, 1.3, 1.4, (1.5)
Injected spray included angle (deg.)	138, 140, 142, 144, ( <u>146</u> )
Injector nozzle hole number	(7), <u>8</u> , 9
Compression ratio	(17.0), <u>17.5</u> , 18.0

영역만을 계산하였기 때문에 최적화 설계인자 중 분공수의 변화에 따라 별도의 계산격자를 생성하였고 필요에 따라 KIVA-3V 코드에서 읽어 들이도록 하였다. 마찬가지로 압축비 변화에 따른 해당 계산격자도 따로 생성하였다. 따라서 모두 9개의 계산격자를 미리 생성해 놓고 해당 분공수와 해당 압축비와 일치하는 격자를 읽어 들어서 계산을 수행하였다. 연료 분사기간의 변화는 분사압력 변화와 상사하였으며 본 연구에서는 단발분사만을 고려하였다. 실린더내 초기 스웰비는 원주방향 유속분포가 실린더 중심축을 기준으로 Bessel 함수값 분포로 가정하여 설정하였다.<sup>23)</sup>

Fig. 4는 세대 진행에 따른 최대 목적함수 값의 변화를 나타낸다. 목적함수 값은 50세대가 지나는 동안 7단계의 상승이 있었고 그 값은 기본사양보다 50% 이상 상승하였다. 실제 수렴도는 21 세대 이후에는 크게 향상되지 않는 것을 볼 수 있는데 이 정도 단계에서 최적화된 것으로 판정해도 무리가 없다. 본 해석 사례에서는 단계 7을 최종 결과로 판단하고 그 해석 결과를 기본사양과 비교하였다. 최적화 결과는 Table 2에서 표시한 것 처럼 분사시기를 지연시키고 스웰유동을 강화시키는 특성을 가지고 있다. Figs. 5, 6은 유전알고리즘을 사용하여 해석한 모든 경우의 NOx-Soot, NOx-BSFC 결과와 단계별 최적값을 보여주는데 세대별 대표 값들이 그래프의 원점 부근으로 이동하면서 최적화되는 과정을 잘 보여주고 있다. 그럼중 일부는 실제값은 표기하지 않고 비교 척도만 나타내어 최적화에 따른 개선 효과 등을 설명하였다.

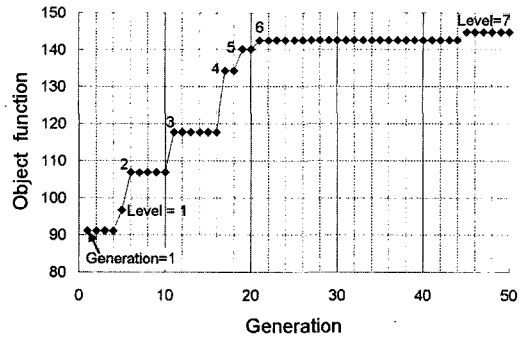


Fig. 4 Convergence trend of the best object function value at each generation

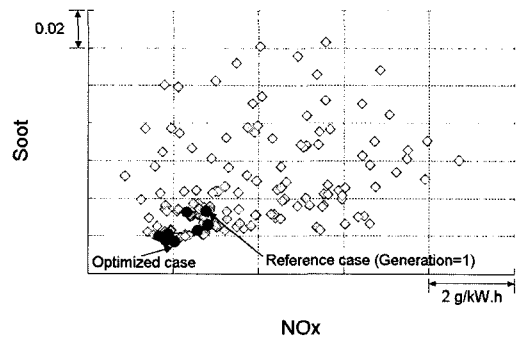


Fig. 5 Predicted NOx vs. soot for all simulation cases including the best values at the optimization levels

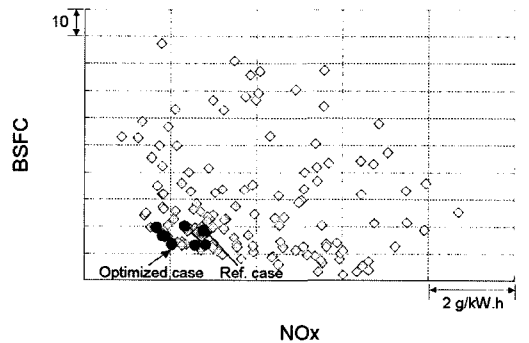


Fig. 6 Predicted NOx vs. BSFC for all simulation cases including the best values at the optimization levels

Fig. 4의 최적화 과정중 단계 5~7에서의 인자변화를 살펴보면 다음과 같다. 우선 목적함수 값은 크게 증가하지 않으며 인자들도 큰 변화 없이 비슷하게 유지되어 최종 최적화 결과로 판단된다. 단계 5, 7은 연료 분사시기가  $-1^\circ$  ATDC이고 단계 6은 TDC이었다. 이에 따라 단계 6에서의 NOx는 상대적으로

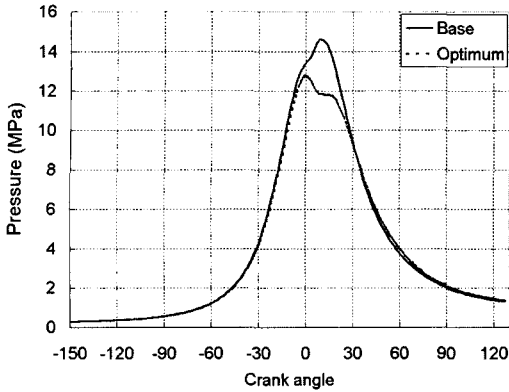


Fig. 7 Comparison of predicted cylinder pressure for the baseline case and the optimum case

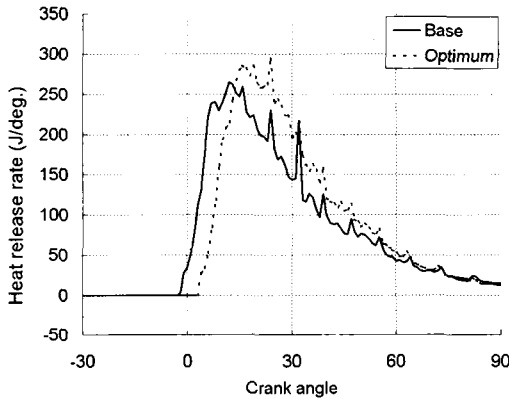


Fig. 8 Comparison of predicted heat release rate for the baseline case and the optimum case

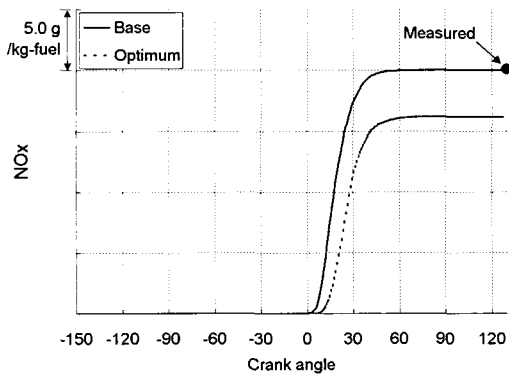


Fig. 9 Comparison of predicted NOx for the baseline case and the optimum case

증가하였으나 Soot와 BSFC는 향상되었다. 단계 7은 단계 6보다 압축비가 17.5에서 17.0으로 감소하고

다른 인자들은 동일하였다. 이에 따라 NOx가 상대적으로 감소했으나 출력과 BSFC는 약간 악화되었다. Figs. 5, 6에서 나타낸 원형 기호는 각 최적화 단계에서 가장 좋은 NOx, Soot, BSFC 값을 표시하는데 이것들 중 어느 것을 중요시 하느냐에 따라 단계 5~7중 하나를 최종 최적화 결과값으로 선택할 수 있을 것이다.

Figs. 7~9는 기본사양과 최종 단계 7에서의 결과를 비교한 그림들을 보여준다. Fig. 7에서 보면 최고 실린더압력은 20 bar 정도 낮으나, 팽창과정중의 실린더 압력이 약간 높게 되어 엔진출력 결과는 유사하게 나타났다. Fig. 8의 열발생률 선도는 분사 지연에 따른 특성을 잘 보여주고 있는데 NOx를 저감하기 위해 연료 분사시기가 상사점 이후로 지연된 결과를 알 수 있다. Fig. 9는 기본사양과 최종 단계의 NOx 변화를 나타낸 그림이다. 기본사양의 경우는 엔진시험 NOx 값과 일치하도록 관련 KIVA-3V코드 내의 모델 계수를 조정 한 결과이고 최종 단계의 경우 15% 이상 저감되는 것을 보여준다.

#### 4. 결론

직접분사식 대형디젤엔진의 연소시스템을 효율적으로 최적화하는 기법을 개발하기 위해  $\mu$ GA 기법을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 3차원 연소해석 코드를 사용한 다양한 설계 및 운전 인자를 최적화하는 기법으로써  $\mu$ GA 기법이 유용하게 활용될 수 있음을 보여주었다.
- 2) 일정 엔진회전수 조건에서 직접분사식 디젤엔진의 연소최적화 사례로 흡기스월비, 연료분사 내각, 인젝터 분공수, 압축비의 4개의 설계인자와 연료 분사시기, 연료 분사기간의 2개의 운전 인자를 최적화한 결과 목적함수 값이 기본사양의 값에서부터 급속히 증가하며 50% 이상 향상되는 최적화가 가능하였다.
- 3) 목표로 하는 배기규제치와 엔진 운전제한 조건을 설정하고  $\mu$ GA 기법을 이용하여 전체 운전 엔진회전수 영역에서의 연소최적화를 수행한다면 엔진개발 과정에 적용될 수 있는 더욱 효율적인 연소최적화 기법이 될 것이며 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

References

- 1) D. E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.
- 2) D. L. Carroll, "Genetic Algorithms and Optimizing Chemical Oxygen-Iodine Laser," Developments in Theoretical and Applied Mechanics, Vol.18, pp.411-424, 1996.
- 3) D. L. Carroll, "Chemical Laser Modeling with Genetic Algorithms," AIAA Journal, Vol.34, No.2, pp.338-346, 1996.
- 4) C. A. Coello Coello, A. D. Christiansen, F. Santos Hernandez, "A Simple Genetic Algorithm for the Design of Reinforced Concrete Beams," Engineering with Computers, Vol.13, No.4, pp.185-196, 1997.
- 5) K. H. Kim, C. K. Hong, "Optimization of a Side Airbag Release Algorithm by Genetic Algorithm," Transactions of KSAE, Vol.6, No.5, pp.45-54, 1998.
- 6) D. H. Lee, T. S. Kim, J. J. Kim, "Optimum Design Suspension System Using a Genetic Algorithm," Transactions of KSAE, Vol.8, No.5, pp.138-147, 2000.
- 7) S. H. Han, D. H. Yoon, J. S. Lee, J. H. Yoo, "Topology Optimization of a Brake Pad to Avoid the Brake Moan Noise Using Genetic Algorithm," Transactions of KSAE, Vol.10, No.4, pp.216-222, 2002.
- 8) S. P. Edward, A. D. Pilley, S. Michon, G. Fournier, "The Optimization of Common Rail FIE Equipped Engines Through the use of Statistical Experimental Design, Mathematical Modeling and Genetic Algorithms," SAE 970346, 1997.
- 9) P. K. Senecal, 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.
- 10) D. D. Wickman, P. K. Senecal, R. D. Reitz, "Diesel Engine Combustion Chamber Geometry Optimization Using Genetic Algorithms and Multi-Dimensional Spray and Combustion Modeling," SAE 2001-01-0547, 2001.
- 11) R. Shrivastava, R. Hessel, R. D. Reitz, "CFD Optimization of DI Diesel Engine Performance and Emissions Using Variable Intake Valve Actuation with Boost Pressure, EGR and Multiple Injections," SAE 2002-01-0959, 2002.
- 12) M. P. Thiel, A. E. Klingbeil, R. D. Reitz, "Experimental Optimization of a Heavy-Duty Diesel Engine Using Automated Genetic Algorithms," SAE 2002-01-0960, 2002.
- 13) H. Hiroyasu, H. Miao, T. Hiroyasu, M. Miki, J. Kamiura, S. Watanabe, "Genetic Algorithms Optimization of Diesel Engine Emissions and Fuel Efficiency with Air Swirl, EGR, Injection Timing and Multiple Injections," SAE 2003-01-1853, 2003.
- 14) A. A. Amsden, "KIVA-3V: A Block-Structured KIVA Program for Engines with Vertical or Canted Valves," Los Alamos National Laboratory Report No. LA-13313-MS, 1997.
- 15) <http://cuaerospace.com/carrol>.
- 16) K. Krishnakuma, "Micro-Genetic Algorithms for Stationary and Non-Stationary Function Optimization," SPIE 1196, Intelligent Control and Adaptive Systems, 1989.
- 17) M. A. Patterson, R. D. Reitz, "Modeling the Effects of Fuel Spray Characteristics on Diesel Engine Combustion and Emission," SAE 980131, 1998.
- 18) S. C. Kong, Z. Han, R. D. Reitz, "The Development and Application of a Diesel Ignition and Combustion Model for Multidimensional Engine Simulation," SAE 950278, 1995.
- 19) H. Hiroyasu, K. Nishida, "Simplified Three-Dimensional Modeling of Mixture Formation and Combustion in a D.I. Diesel Engine," SAE 890269, 1989.
- 20) J. Nagle, R. F. Strickland-Constable, "Oxidation of Carbon between 1000-2000°C," Proc. of the 5th Conf. on Carbon, Vol.1, pp.154-164, 1962.
- 21) C. T. Bowman, "Kinetics of Pollutant Formation and Destruction in Combustion," Progress of Energy Combustion Science, Vol.1, pp.

33-45, 1975.

22) D. T. Montgomery, R. D. Reitz, "Optimization of Heavy-Duty Diesel Engine Operating Parameters Using a Response Surface Method," SAE 2000-01-1962, 2000.

23) A. A. Amsden, P. J. O'Rourke, T. D. Butler, "KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays," Los Alamos National Laboratory Report LA-11560-MS, May 1989.