

HSDI 디젤엔진의 연소계 최적화 해석기술 개발

이 제 형* · 이 준 규

현대기아 연구개발본부

Development of the Optimization Analysis Technology for the Combustion System of a HSDI Diesel Engine

Je-Hyung Lee* · Joon-Kyu Lee

Corporate R&D Division, Hyundai Kia Motors, 772-1 Jangduk-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-706, Korea
(Received 18 July 2005 / Accepted 15 October 2005)

Abstract : To optimize the combustion system in a HSDI diesel engine, a new analysis technology was developed. The in-cylinder 3-D combustion analysis was carried out by the modified KIVA-3V, and the spray characteristics for the high pressure injection system were analyzed by HYDSIM. The combustion design parameters were optimized by coupling the KIVA-3V and the iSIGHT. The optimization procedure consists of 3 steps. The 1st step is the sampling method by the Design of Experiment(DOE), the 2nd step is the approximation using the Neural Network method, and the 3rd step is the optimization using the Genetic Algorithm. The developed procedures have been approved as very effective and reliable, and the computational results agree well with the experimental data. The analysis results show that the optimized combustion system in a HSDI diesel engine is capable of reducing NOx and Soot emissions simultaneously keeping a same level of the fuel consumption(BSFC).

Key words : Injection characteristics(분사특성), Combustion(연소), Emission(배출가스), Optimization analysis(최적화 해석), Neural network(신경망), Diesel engine(디젤엔진), HYDSIM, KIVA-3V, iSIGHT

Nomenclature

T : temperature, K
P : pressure, Pa
BSFC : Brake Specific Fuel Consumption, g/kWh

Subscripts

c : cylinder
o : base

1. 서론

승용 디젤엔진 기술의 연구개발 방향은 배기규제 대응 및 연비 향상(CO₂규제)을 위한 연소계 및 후처리계의 최적화 뿐 아니라, 엔진 개발기간 및 비용을 최소화 하는 것이다. 디젤엔진 연소계의 최적화를 위하여 과거에는 주로 시험에 의존하였으나 최근에는 엔진 연소실 내 3차원 연소해석 기술을 적용하는 사례가 늘어 가고 있다.¹⁻³⁾ 엔진 연소 해석 기술은 엔진 연소계 최적화 뿐 아니라 최적 운전조건 도출, 시험결과의 타당성 파악 및 원인 규명을 위한 이론적 근거 제공을 통하여 엔진 개발 과정에 활용되고 있다.

*To whom correspondence should be addressed.
jehglee@hyundai-motor.com

최근, 엔진 연소해석 기술의 중요성은 충분한 해석 신뢰성 확보, 컴퓨터 성능 향상, 최적화 기법의 도입으로 인하여 엔진개발 초기 단계부터 더욱 커지고 있다.

본 연구는, 승용 디젤엔진 개발 시, 연비를 동등 수준으로 유지하고 NOx 및 Soot를 저감할 수 있는 최적 연소계 설계를 위하여, 새로운 최적화 연소해석 기법을 개발하고 적용 효과를 확인 하는 것에 초점을 맞추었다.

2. 최적화 기법 및 설계변수

2.1 최적화 해석기법

연소계 최적화 해석 기법은 사용목적에 따라 다양하다. Fig. 1(a)은 최근의 연소계 최적화해석의 대표적 접근 방법으로서 Wisconsin 대학에서 개발한 연소해석과 최적화 알고리즘(GA)을 연계하는 해석 방법이다.¹⁾ 이 방법은 정확도가 높다는 장점이 있으나, 3차원 연소해석 시 수 많은 반복 계산을 수행하여야 하므로 계산시간의 효율성이 떨어진다는 단점이 있다.

FORD에서는 샘플링 기법(DOE)을 사용하는데 연소해석 결과 중 최적치를 기초로 하여 Gradient 베이스의 최적화 알고리즘과 연소해석을 결합하는 방법을 적용하고 있다.²⁾(Fig. 1(b)) 이 방법은 계산시간 측면에서는 우수 하나, 국부적인 최적치를 전체적인 최적치로 인식하는 오류를 범할 수 있으므로, 정

확도가 상대적으로 저하되는 단점이 있다.

2.2 실험계획법, 신경망 기법, 유전자 알고리즘의 결합

본 연구에서 제안 된 최적화 해석 기법은 Fig. 1(c)과 같으며 3단계의 과정으로 구성되어 있다. 제1 단계는 샘플링 기법(DOE)을 사용한 해석 케이스의 Matrix 작성과 각 Case에 대한 연소해석의 수행이다. 제2단계는 연소해석 결과에 대하여 신경망(Neural Network)기법⁴⁾을 적용한 근사모델의 구성이다. 제3 단계는 신경망 근사모델과 최적화 알고리즘(GA)을 상호 연계하여 최적치를 찾고, 연소해석을 통하여 검증하는 과정이다. 이 방법은 정확도와 계산시간의 효율성을 동시에 만족시킬 수 있으며, 시험 분야에도 확장 적용할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 다만, 최초 DOE에 의한 케이스 Matrix 작성 시 설계변수의 범위를 명확히 설정하는 것이 중요하다. 비선형성이 강한 문제의 경우, 해석 케이스 수가 많을수록 신경망 근사모델의 정확도가 증대되어 최적 결과의 신뢰도가 향상 되므로 해석 케이스의 선정이 중요하다.

본 연구에서는 이와 같은 일련의 최적화 해석 과정을 제어하고 자동화하기 위하여 iSIGHT⁴⁾를 사용하였다.

2.3 문제 정의

디젤엔진 연소계의 최적화를 위하여 문제의 정의를 아래와 같이 구성하였으며, 설계변수를 Fig. 2와 Table 1에 나타내었다.

- 설계변수: 연소실 형상, 스웰비, 분사각, 분공경
- 목적함수: NOx, Soot의 동시 저감
- 구속조건: 연비 동등 수준
(전부하 및 부분부하의 동시 고려)

연소실 형상은 피스톤 보울의 형상을 6가지로 변경하였다(Fig. 2).

Table 1은 4기통 2.0L급 HSDI 디젤엔진의 베이스 연소계 사양 및 최적 연소계 설정을 위한 설계변수의 변경 범위를 나타낸다. 운전조건은 전부하/4000rpm, 부분부하/2000rpm에 대하여 평가하였다.

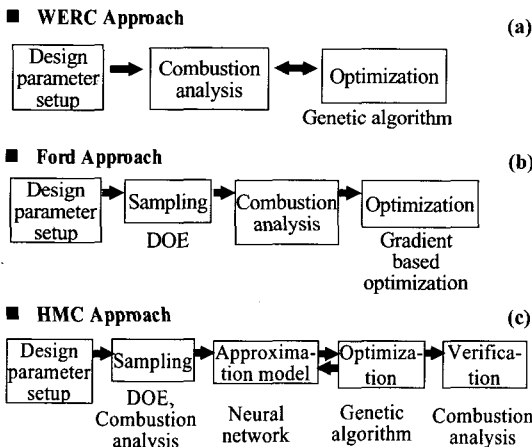


Fig. 1 Proposed optimization analysis process

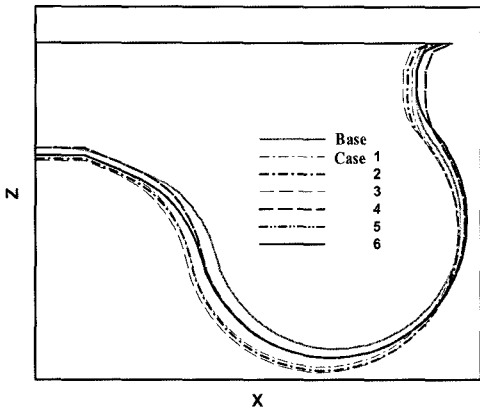


Fig. 2 Piston bowl configuration

Table 1 Engine specification

	Base combustion system	Optimum combustion system
Bore × Stroke (mm)	83 × 92	<--
Swirl ratio(-)	1.36	1.~ 3.
Injection angle(°)	148	140~160
Nozzle hole size(mm)	0.141	0.12~0.15

3. 베이스 연소계의 연소해석

엔진 연소실 내 3D 연소해석을 위하여 KIVA-3V⁶⁾를 적용하였다. 이 때 필요한 엔진 초기 및 경계조건 중 커먼레일 분사계의 분사율, 분사시기, 분사기간에 관한 정보를 얻는 것은 연소해석의 신뢰성 향상을 위하여 매우 중요하다. 인젝터의 분사특성 해석을 위하여 1D 유압 해석 툴인 HYDSIM⁵⁾을 사용하였다. 연소해석 결과를 시험치와 비교 및 검증하여 최적화 해석을 위한 적용 가능성을 평가하였다.

3.1 분사특성 해석

고압 커먼레일 인젝터의 분사특성 해석을 위하여 인젝터를 역공학하였으며, 분사펌프에서 커먼레일, 인젝터 및 노즐까지의 유압 회로 각각의 요소를 HYDSIM을 이용하여 모델링하였다.⁷⁾ 초기 경계조건으로서 Table 2와 같은 분사압력/분사시기/분사기간의 ECU 설정치를 입력하였다.

Fig. 3은 분사율의 해석 결과이다. ECU 전류신호와 대비하여 분사시기 및 분사기간이 각각 약 200 μs, 300~400 μs 지연 되는 것을 확인 할 수 있었다.

Table 2 Injection data for ECU use

rpm	Injection pressure (bar)	Pilot injection		Main injection	
		Injection start (°ATDC)	Injection duration (°CA)	Injection start (°ATDC)	Injection duration (°CA)
2000	927	-35.5	2.9	-1.5	8.2
4000	1600	-	-	-19.9	23.4

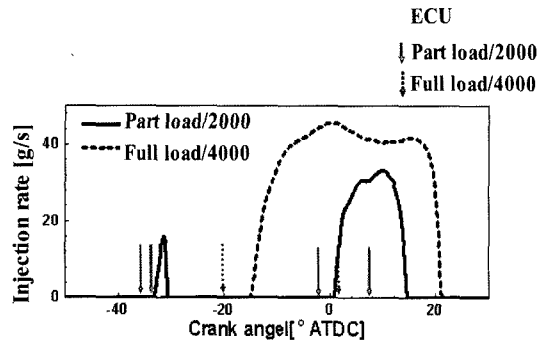


Fig. 3 Injection characteristics

3.2 연소 해석

엔진 연소실 내 분무에 의한 혼합기형성, 연소 및 배기생성 과정을 해석하기 위하여, 축대칭의 연소실에서 분무 1개가 점하는 영역을 Fig. 4와 같이 모델링하였다. 또한 Crevice체적을 고려하여 압축비를 맞추었다. 흡기밸브 닫힘시기(IVC = BTDC 151°)를 초기로 하여 배기밸브 열림시기(EVO = ABDC 147°)까지 연소해석을 수행하였다. 엔진 운전조건별 초기/경계 조건을 Table 3에 정리하였다.

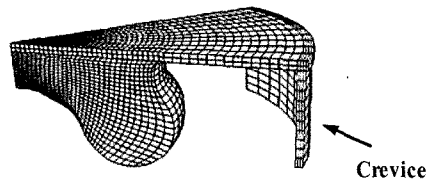


Fig. 4 Combustion chamber model (Mesh number = ~ 25000)

Table 3 Engine operational conditions

	2000rpm	4000rpm
Initial temperature, T _c (K)	384.0	377.3
Initial pressure, P _c (bar)	1.438	1.438
Air mass (g)	0.656	1.178
Fuel mass (mg)	25.1	55.8

엔진 연소실 내 공기 온도의 초기(IVC)치는 흡입 공기량과 실린더 압력의 시험치로 부터 산출하였다. 연료는 $C_{14}H_{30}$ (Tetradecane)으로 가정하였다.

분무/연소 및 배기생성 과정을 해석하기 위하여 KIVA-3V의 기본적인 물리/화학적 모델을 다음과 같이 개선하여 적용하였다.⁸⁾

- 분무의 미립화 과정: KH-RT 분무분열 모델
- 착화 과정: 8-스텝 Shell 모델
- 연소 과정: Characteristic Time Scale 모델
- NOx 생성과정: 확장 Zel'dovich 메커니즘
- Soot 생성/산화과정: Hiroyasu/NSC 모델

엔진 연소해석의 결과인 연소압력으로 부터 엔진 연비(BSFC)를 산출하기 위하여, 마찰손실(FMEP: Friction Mean Effective Pressure)과 펌핑손실(PMEP: Pumping Mean Effective Pressure)의 시험치를 이용하였다.⁸⁾

4. 해석결과 및 고찰

4.1 연소해석 기술의 검증

엔진 연소해석 결과를 검증하기 위하여 Fig. 5에 연소압 및 열발생률을 시험치와 비교하였다. 부분부하 및 전부하 조건에서 연소압 및 열발생률의 해석치는 시험치 대비하여 정성적/정량적으로 잘 일치하는 것을 확인하였다. 연소해석 기술을 연소계 최적화 해석에 적용하기에 충분히 만족할 만한 수준이라고 판단된다.

4.2 연소계 최적화 해석

샘플링 기법(DOE)을 적용하여 연소해석 120 케이스의 Matrix를 작성하였다. 각 케이스에 대하여 각 설계변수들(스월비/분사각/분공경)이 목적함수(NOx/Soot) 및 구속조건(BSFC)에 미치는 영향을 분석하였으며 Fig. 6에 나타내었다.

설계변수 레벨에 따른 목적함수의 변동량(기울기)을 비교 할 때, 전부하/4000rpm의 경우, 스월비/분공경/분사각의 순으로 영향도가 크며, 부분부하/2000rpm의 경우는 분공경/분사각/스월비 순이라는 것을 파악할 수 있었다.

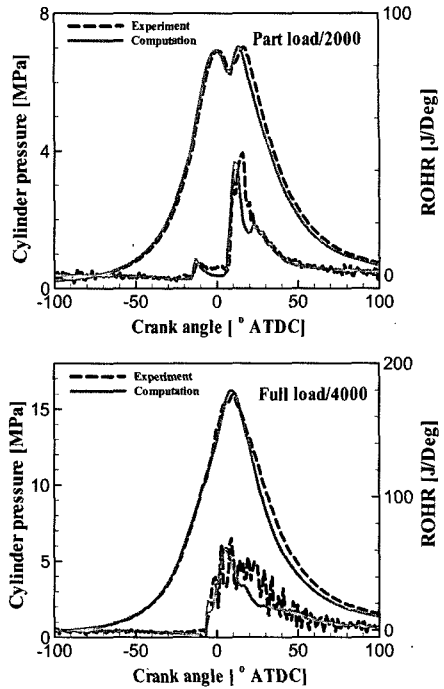


Fig. 5 Combustion pressure for part and full load

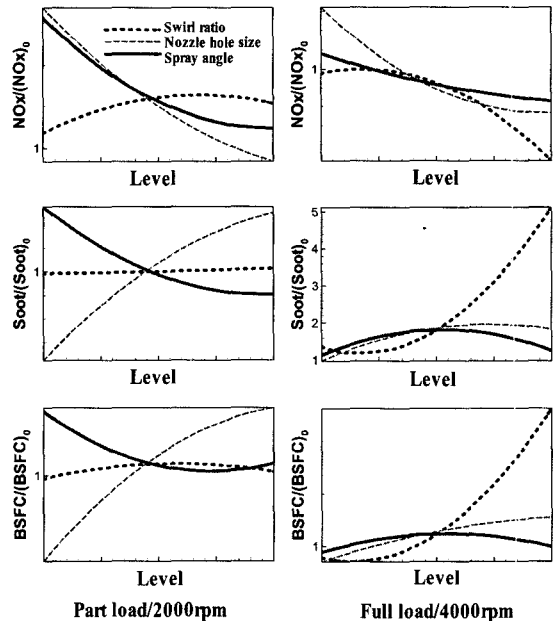


Fig. 6 Effects of design parameters

신경망 근사모델 상에서 유전자알고리즘(GA) 최적화 기법을 전부하, 부분부하 각각의 경우와 전/부분부하를 함께 고려한 경우에 대하여 해석하였다.

총 약 3000회의 반복 계산 한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. NOx와 Soot 농도는 뚜렷한 Trade-Off의 경향을 나타내는 것을 알 수 있으며, 베이스 엔진 연소계의 배기 농도를 'X'로 표시하였고, NOx 및 Soot를 동시저감 할 수 있는 배기의 최적치는 사각형의 점으로 표시하였다. 전부하 및 부분부하를 동시 고려한 경우, 최적치는 베이스 경우 대비하여 NOx 18%/ Soot 26%를 저감 할 수 있었다. 이 때, 전부하/4000rpm의 경우 NOx 18%/ Soot 32% 저감하였고, 부분부하/2000rpm의 경우 NOx 13%/ Soot 10% 저감하였다.

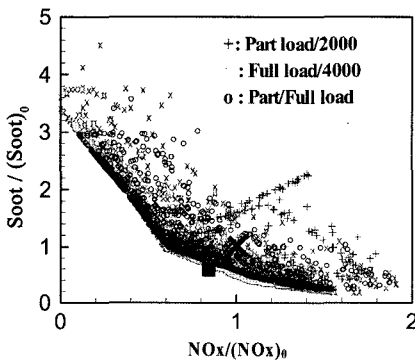


Fig. 7 Results of optimization analysis (Effects on emission reduction)

전부하/부분부하를 함께 고려한 경우, 설계변수의 최적치를 Table 4에 나타내었다. 연소실 형상은 케이스1이 최적이었으며, 베이스 엔진 대비하여 낮은 스웰비/ 큰 분사각/ 동등수준의 분공경을 사용하는 것이 NOx/Soot의 동시 저감에 유리하다는 결과를 얻었다.

신경망 기법에 의한 배기농도의 최적치를 검증하기 위하여 최적 설계변수에 대하여 3D 연소해석을 수행하였으며 Fig. 8에 최적 연소압을 나타내었다. 연소압 및 열발생률의 상승 기울기가 감소하여

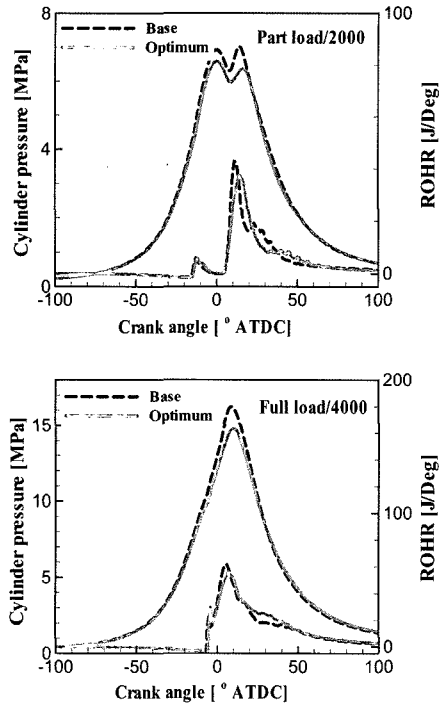


Fig. 8 Optimum combustion pressure

NOx가 저감되며 확산연소 부분의 열발생이 활발하여 Soot가 저감되는 효과를 확인 할 수 있다. 최적 설계변수에 대하여 3D 연소해석 및 신경망기법에 의한 각각의 배기농도 비교는 오차범위 5% 이내에서 일치하였다.

5. 결론

본 논문에서는 연소계 최적화 해석 기술을 개발하기 위하여 실험계획법(DOE), 신경망기법(Neural Network), 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 성공적으로 결합하여 적용하였으며, 디젤엔진의 연비를 동등 수준으로 유지하면서 배기를 저감하기 위한 연소계의 최적 설계조건을 도출하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

베이스 엔진 연소해석

- 1) 분사특성 해석 결과 분사시기는 ECU 설정치 대비하여 약 200 μ s 지연되며, 분사기간은 약 300 ~ 400 μ s 연장 됨을 확인하였다.
- 2) 연소해석 결과 실린더 내 연소압과 열발생률은

Table 4 Optimum design parameters

Combustion chamber configuration	Base engine	Optimum (Case 1)
Swirl ratio	1.36	1.01
Injection angle	148°	160°
Nozzle hole size	0.141mm	0.1398mm

시험치와 정성적/정량적으로 잘 일치하였다.

최적화 해석

- 1) 기존 방법과 달리, 정확성과 효율성을 동시에 만족시킬 수 있는 최적화 방법을 개발 제안하였다.
- 2) DOE 샘플링에 기초한 최적화 방법을 적용하여 각 설계변수가 목적함수에 미치는 영향도 분석을 하였다. 전부하 및 부분부하의 경우 각각 스웰비 및 분공경이 배기에 미치는 영향이 가장 크다.
- 3) 전부하 및 부분부하 운전조건을 함께 고려한 경우 동등연비에서 NOx 18%/ Soot 26%를 동시에 저감할 수 있는 최적설계 변수가 존재 하였다. 베이스 엔진 대비 낮은 스웰비/ 큰 분사각/ 동등수준의 분공경을 사용하는 것이 NOx/Soot의 동시 저감에 유리하다.
- 4) 최적화기법에서 도출된 최적 설계변수에 대하여 3D 연소해석 수행 결과, 배기농도의 차이는 오차 범위 5% 이내에서 일치하였다.

본 연구를 통하여 연소해석에 의한 신 엔진 연소계의 최적 설계변수 설정이 가능하여 엔진 연소계 개발기간 단축 및 비용절감에 효과적으로 기여하리라 판단된다.

향후, 운전조건 최적화³⁾에 확대 적용 가능하여, 최적화 연소해석의 활용도가 더욱 증가 될 것으로 기대 된다.

후 기

본 연구에서, 엔진 연소해석 최적화 기법의 개발을 위하여 최적화 툴인 iSIGHT의 적용에 관한 기술적 협조를 아끼지 않은 인지니어스코리아(주)의 김문성님께 깊은 감사를 표합니다.

References

- 1) D. D. Wickman, H. Yun and R. D. Reitz, "Split-Spray Geometry Optimized for HSDI Diesel Engine Combustion," SAE 2003-01-0348, 2003.
- 2) C.-A. Hergart, W. Willems and H. Wenzel, "Automatic Combustion System Optimization in a DI Diesel Engine," iSIGHT User Meeting, 2001.
- 3) J. K. Lee, J. H. Lee, K. G. Yeo and M. S. Kim, "Application of Optimization Analysis for Developing the Multiple Injection Strategy in a HSDI Diesel Engine," Spring Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.417-422, 2004.
- 4) iSIGHT 9.0: A Generic Software Shell that Improves Productivity in the Design Process, Engineous, 2004.
- 5) HYDSIM: A Program for the Dynamic Analysis of Hydraulic and Hydro-mechanical Systems, AVL, 2001.
- 6) A. Amsden, "KIVA-3V: A Block-Structured KIVA Program for Engines with Vertical or Canted Valves," Los Alamos Laboratory Report No. LA-13313-MS, Los Alamos, New Mexico, 1997.
- 7) J. K. Lee and J. H. Lee, "Combustion Process Analysis in a HSDI Diesel Engine Through the Analysis of the Common Rail Injection System," Fall Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.372-377, 2003.
- 8) Y. Yi, R. Hessel, G.-S. Zhu and R. Reitz, "The Influence of Physical Input Parameter Uncertainties on Multidimensional Model Predictions of Diesel Engine Performance and Emissions," SAE 2000-01-1178, 2000.