Transactions of KSAE, Vol. 17, No. 5, pp.16-25 (2009)

Copyright © 2009 KSAE
1225-6382/2009/101-03

실험계획법과 WAVE 시뮬레이션을 이용한 엔진 작동 변수의 영향도 평가 및 최적화에 대한 연구

정 동 원[1] · 임 옥 택[*2]

울산대학교 기계 · 자동차공학부 대학원[1] · 울산대학교 기계 · 자동차공학과[2]

An Application of DoE Methodology in WAVE Simulation to Identify the Effectiveness of Variables on Engine Performance and to Optimize Responses

Dongwon Jeong[1] · Ocktaeck Lim[*2]

[1]*Graduate Department of Mechanical and Automotive Engineering, Ulsan University, Ullsan 680-749, Korea*
[2]*Department of Mechanical and Automotive Engineering, Ulsan University, Ulsan 680-749, Korea*
(Received 15 October 2008 / Accepted 11 May 2009)

Abstract : Testing engine performance using an engine dynamometer requires high technical researchers and many facilities. Nowadays, different variables of CAE program are used for identifying the engine performance instead of engine dynamometer test. This is more convenience, as it does not necessitate an abundance of engine dynamometer experiments and, in addition, produces better results. However, CAE programs also contain various variables which can affect engine performance. Those are coupled with each other, thus making it difficult to determine the effectiveness of different variables on engines. DoE (Design of Experiments) methodology is an efficient way to verify the magnitude of effectiveness on engine performance as well as making responses to be optimized at once without trial & error. This study used data from WAVE simulations, which modeled the DOHC SI engine with in-line 4 cylinders at 1500, 3000 and 4500rpm. DoE methodology is designed properly to determine the effectiveness of five variables on power, BSFC, and volumetric efficiency, as well as to find the optimal response conditions at each rpm through a minimized number of experiments. After finishing DoE process, all the results are examined concerning the reliability of test through a verification experiment.

Key words : Design of experiments(실험계획법), WAVE(CAE프로그램), Response(반응변수), Variable(인자), Effectiveness(영향도), Optimization(최적화)

Nomenclature

DoE : design of experiments
CAE : computer aided engineering
RPM : rapid per minute
BSFC : brake specific fuel consumption
CA50 : location of 50% burn point
C.L.temp : cylinder liner temperature
P.T.temp : piston top temperature
Heat.Co : exhaust manifold heat coefficient
Valve.Co : valve coefficient

*Corresponding author, E-mail: otlim@ulsan.ac.kr

1. 서 론

엔진 다이나모메터를 이용한 엔진성능 시험은 실험 목적에 따라 실험 장치가 다르고 전문적인 기술을 갖춘 인력이 요구된다. 최근에는 실험 장치 구성

에 필요한 시간과 비용을 줄이고 인력을 최소화 하기 위해, 상용 CAE프로그램을 사용하여 실험 장치를 모델링 한다. 모델링 된 실험 장치를 시뮬레이션 하면 실제성능 시험에 요구되는 장치 비용 없이 엔진 성능에 영향을 미치는 인자들의 종류와 범위를 자유롭게 변화시켜가며 원하는 결과를 얻을 수 있다. 또한 시뮬레이션은 동일한 실험 횟수에서도 다양한 결과를 동시에 얻고 조건 변화에 따른 결과의 비교가 용이하기 때문에 실제 엔진 성능 시험보다 효율적이다.[1] 하지만, 상용 CAE프로그램 내에서도 실제실험과 같이 결과에 영향을 미치는 인자들이 많이 존재하고, 인자들 간에도 상호작용이 발생하기 때문에 특정 성능을 최적화시키기 위해서는 많은 시간과 비용이 요구된다.[2]

본 연구에서는 파악하고자 하는 엔진성능(반응변수)에 관련된 인자들 중 핵심 인자를 찾고, 반응변수에 대한 인자들의 영향도 평가 및 엔진성능 최적화에 필요한 시간과 비용을 절감하기 위해 실험계획법(Design of Experiments, DoE)을 사용하였다. 실험계획법은 실험에 대한 계획 방법을 의미하는 것으로서 해결하고자 하는 문제에 대하여 최소의 실험회수로부터 최대의 정보를 얻고자 실험을 계획하는 것이다.[3] WAVE는 실험장치 모델링에 사용된 CAE프로그램으로써 엔진 시스템을 1차원으로 모델링하고 시뮬레이션을 통해 내연 기관내의 현상을 분석 한다.[4]

다섯 가지 인자들의 범위와 수준을 조정하여 WAVE에 입력한 후 시뮬레이션을 통해 세가지 반응변수의 결과를 구했다. 그 결과를 실험계획법 프로그램을 통해 분석하여 반응변수에 대한 각 인자들의 영향도를 파악하고 반응변수들을 최적화하는 최적공정조건을 찾았다. 최적공정조건 상태의 인자값을 다시 WAVE에 대입한 후 시뮬레이션 하여 WAVE상의 반응변수 최적값을 구하고, 그 값을 실험계획법 프로그램에서 구한 반응변수 최적값과 비교하여 계산 결과의 신뢰성을 파악했다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 엔진 및 엔진 모델링

모델링에 사용된 엔진은 배기량 1975cc, 압축비 10.1인 4기통 엔진을 사용하였으며 주요 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of modeling engine

Type	DOHC
Displacement (mm)	1975cc
Compression Ratio	10.1
Valve System	4 Valve per cylinder
Ignition timing	BTDC 10 ± 5°
Ignition order	1 – 3 – 4 - 2

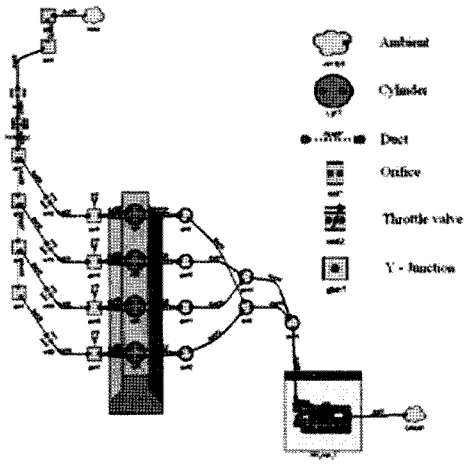

Fig. 1 Modeling of SI engine by WAVE

Fig. 1은 WAVE 상에서 보여지는 모델링된 엔진의 모습이다. 모델링을 할 경우 엔진의 하드웨어 부분과 온도, 압력등과 같은 환경적 요인의 일치가 매우 중요하다. 하드웨어 부분을 모델링할 경우 엔진의 하드웨어 부분과 온도, 압력등과 같은 환경적 요인의 일치가 매우 중요하다. 하드웨어 부분을 필요한 각 부품의 치수는 실측을 통하여 구하고, 단면적이 일정치 못한 경우에는 동일한 면적을 가지는 원형태로 근사화 하여 직경을 측정했다. CA50나 BDUR 같이 측정을 통해 구하기 힘든 부분은 WAVE 매뉴얼에 제시된 실험식과 관일치가 매우 중요하다. 하드웨어 부분은 모델링에 관련된 논문과 전문가의 의견을 통해 인자값을 설정하였다. 엔진의 모델링이 끝나면 일정한 조건에서 시뮬레이션 하여 결과값을 구하고 동일한 조건에서 구한 실제 실험 결과값과 비교하여 그 결과의 오차가 3% 이내

에 들어오도록 Try & Error를 반복했다. 전 부하(WOT)에서 엔진 속도에 따른 시뮬레이션과 실제 실험 결과값의 오차범위가 3% 내에 들어오면 엔진 모델링은 유효하다고 판단했다.[5]

2.2 실험 조건

시뮬레이션의 계산을 통해 모든 결과를 구했으며 전 부하영역(WOT)에서 엔진 속도 변화에 따른 결과의 차이를 알고자 1500, 3000, 4500rpm에서 계산을 실시했다. 시뮬레이션을 통해 얻은 계산이기 때문에 실제 엔진 실험에서 고려해야 할 실험실 온도, 습기등과 같은 주위 환경 요인들은 결과에 영향을 미치지 않는다고 가정했다.

본 연구에서 파악하고자 하는 엔진 성능은 Power, BSFC, Volumetric efficiency이며 실험계획법에서 반응변수로 설정했다. 반응변수 최적화를 실시할 경우 각 반응변수에 대한 특성을 만족시키면서 인자들의 수준 조합을 탐색하기 때문에 실험 결과를 구하기 전에 반응변수들의 특성을 정해야 한다.[6] Power, Volumetric efficiency 는 반응변수가 크면 클수록 좋은 경우인 망대특성을 적용하고 BSFC는 반응 변수가 작으면 작을수록 좋은 경우인 망소특성을 적용하였다. Table 2는 실험에서 정한 세가지 반응변수와 각 특성을 나타낸다.

세 가지 반응변수들의 최적화를 위한 다섯 가지 핵심인자는 CA50, Cylinder liner temperature, Piston top temperature, Exhaust manifold heat coefficient, Valve coefficient 이다. 위의 인자들은 세가지 반응변수에 비교적 영향을 많이 미치는 12가지 인자를 경험적으로 선택한 후 실험계획법을 통하여 다섯 가지 핵심인자를 선별했으며 Table 3은 실험에서 정

Table 2 Response (engine performance)

Factor	Characteristic
Power [hp]	Larger the Better
BSFC [kg / kWh]	Smaller the Better
Volumetric Efficiency	Larger the Better

Table 3 Variable (engine operating parameter)

Factor	Abbreviation	Range
Location of 50% Burned point [deg]	CA 50	14 ~ 20
Cylinder Liner Temperature [℃]	C.L.temp	400 ~ 450
Piston Top temperature [℃]	P.T.temp	650 ~ 700
Exhaust Manifold Heat Coefficient	Heat.Co	0.5 ~ 1
Valve Coefficient	Valve.Co	Low ~ High

한 각 인자들의 이름과 약어, 범위를 나타낸다. Valve coefficient 값은 WAVE 내에서 이미 정해져 있는 값으로서 '밸브리프트/밸브지름'의 변동 추이에 따라 그 값들이 변한다.[4] 작동 조건에 따라 한 사이클당 구해지는 Valve coefficient 값을 조합하여 Low와 High 형태로 표시되므로 그 값을 변경 없이 입력하였으며 Middle은 Low와 High에서 나타난 값의 평균값으로 설정했다.

2.3 실험계획법

실험계획법에서는 실험을 많이 할수록 결과를 정확히 예측할 수 있으나 시간이 많이 요구되고 인자들 간의 상호 작용에 의해 발생하는 과대 추정 때문에 반응변수에 미치는 인자들의 영향도 차이를 알기 어려우므로 실험목적에 적절하게 실험 순서를 설계해야 한다.[7] 실험계획법 설계의 첫 단계로써 최적화를 위한 세가지 반응변수를 정하고 해당 반응변수에 비교적 크게 영향을 미치는 12가지 인자를 경험적으로 정하였다. 실험인자가 많을 경우 실험의 횟수가 급격히 증가하고 경우 결과의 정보손실이 발생할 가능성이 크다. 실험계획법의 '2k 부분 요인배치법(2kfractional factorial design)'은 실험계획 초기에 관련된 인자가 많을 때 효율적으로 핵심 인자를 찾아내는 방법(Screening)이다. 12가지 인자를 '2k 부분 요인배치법'으로 스크리닝 하여 반응변수에 관한 영향도 평가와 반응 변수 최적화에 사용될 다섯 가지 핵심인자를 선택했다. Table 4는 다섯 가지 핵심인자를 찾기 위해 '2k 부분 요인배치법'에 적용한 12가지 인자들과 약어, 범위를 나타낸다. Table 5는 12가지 인자들이 엔진 전반에 미치는 영

Table 4 Variable (engine operating parameter)

Factor	Abbreviation	Range
Location of 50% Burn Point	CA50	20 ~ 30
Combustion Duration 10 ~ 90%	BDUR	24 ~ 26
Piston Top Temperature	P.T.temp	650 ~ 700
Cylinder Liner Temperature	C.L.temp	400 ~ 450
Cylinder Head Temperature	C.H.temp	500 ~ 550
Valve Coefficient	Valve.Co	Low ~ High
Intake Manifold Heat Coefficient	H.C.In	0.5 ~ 1
Engine Heat Coefficient	H.C.En	0.5 ~ 1
Exhaust Manifold Heat Coefficient	H.C.Ex	0.5 ~ 1
Intake Manifold Friction Coefficient	F.C.In	10 ~ 30
Engine Friction Coefficient	F.C.En	200 ~ 600
Exhaust Manifold Friction Coefficient	F.C.Ex	1 ~ 2

Table 5 Response (engine performance)

	Factor	Abbreviation
Performance	Power of engine	Power [hp]
	Brake Specific Fuel Consumption	BSFC [g / kWh]
	Volumetric Efficiency	Vol.Effi
Flow Rate	Fuel Flow Rate	Fuel flow [g/s]
	Air flow Rate	Air flow [g/s]
Pressure	Intake Pressure	In.Pre [Pa]
	Exhaust Pressure	Ex.Pre [Pa]
Temperature	Intake Temperature	In.Temp [K]
	Exhaust Temperature	Ex.Temp [K]

향도를 알아보기 위해 선택한 9가지 반응 변수와 그에 따른 약어를 나타내며 크게 엔진의 성능(Power, BSFC, Volumetric efficiency), 유량(Fuel, Air), 압력(Intake, Exhaust), 온도(Intake, Exhaust) 네 가지 부분으로 나누어서 고려했다.

반응 변수에 대한 최적 공정조건을 찾기 위해서는 선택한 인자들의 범위가 적합해야 하는데 일반적으로 실험 초기에는 인자 범위가 적합한지 알 수 없다. 실험계획법의 '2k 완전 요인배치법(2k full factorial design)'을 통해 반응변수를 1차 식으로 가정하여 실험을 행하고, 그 결과를 회귀 분석한 다음, 가정된 1차 식의 계수를 이용하면 각 인자 범위의 적합성을 판단할 수 있다. 만약 인자들의 범위가 적합하지 않다고 판단되면 실험계획법의 '급경사 접근법(Path of steepest ascent)'을 통해 인자들의 범위를 적합하게 조정할 수 있다. 인자 범위에 대한 적합성은 실험계획법 프로그램에서 보여 지는 분석결과를 근거로 판단하다. 인자들의 범위가 적합하다고 판단되면 추가실험을 통하여 반응변수를 2차 식으로 가정하여 최적화를 시도한다. 하지만 '2k 부분 요인배치법'과 '2k 완전 요인배치법'은 인자들을 2 수준(큼, 작음) 상태에서 반응변수를 분석하기 때문에 3수준(큼, 중간, 작음) 이상이 필요한 2차 식의 추정은 불가능하다. '중심 합성법(Central Composite Designs; CCD)'은 반응변수를 2차 식으로 추정하는 대표적인 방법으로 인자들을 3수준 상태에서 반응변수를 고려하기 때문에 2차 식으로 가정할 수 있다. 1차식 에서와 마찬가지로 2차 식을 회귀 분석하면, 반응변수를 최적화 하는 최적공정조건을 구할 수 있다. 회귀 분석된 2차 식의 각 계수들은 반응변수에 대한 각 인자들의 영향도를 나타내는 것으로써 정량적 분석뿐만 아니라 그래프를 통한 정성적 분석도 가능하다. 위의 결과를 바탕으로 실험계획법 프로그램내의 '단일 반응변수 최적화(Single response optimization)'를 실행하면 특정 반응변수의 특성만을 최대로 고려한 최적공정조건을 구할 수 있다. '단일 반응변수 최적화(Single response optimization)'는 특정 반응변수의 특성만을 최대로 고려하기 때문에 다른 반응변수의 특성에 대한 관점에서는 최적공정조건이 아닐 수 있다. 세 가지 반응변수의 특성을 동시에 고려하기 위해 실험계획법 프로그램내의 '다중 반응변수 최적화(Multiple response optimization)' 를 실행하여 여러 개의 반응변수의 특성을 최적화 하고 동시에 인자들의 최적공정조건을 찾았다. Fig. 2는 본 실험에서 설계한 실험계획법의 흐름도이다.

실험계획법은 통계적 분석을 바탕으로 한다. 통계적 최적값은 회귀식이 100% 정확하다는 가정하에서 회귀 분석을 통해 구한 값이기 때문에 최종 결과값에 대하여 반드시 확인 실험을 해야 한다.[7] '다중 반응변수 최적화'를 실행하여 얻은 인자들의 최적공정 값을 WAVE에 대입하고 시뮬레이션 하여 세가지 반응변수 값을 구한 다음 WAVE를 통해 얻은 반응변수 값을 실험계획법을 통해 얻은 반응변

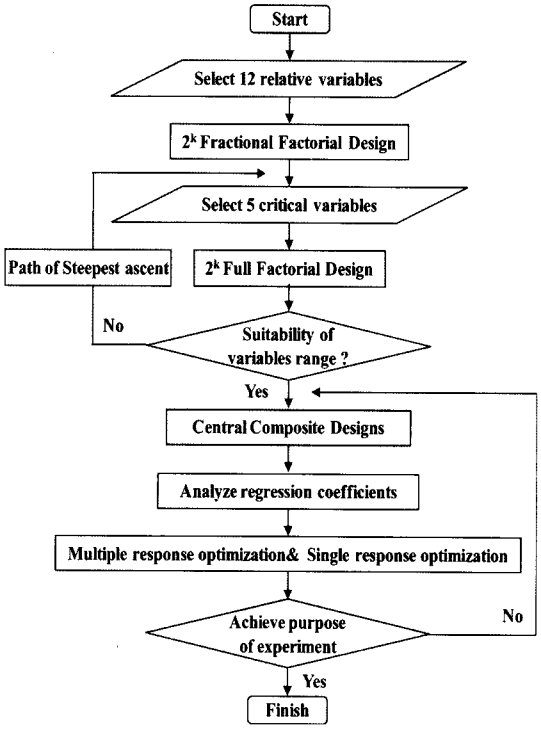

Fig. 2 Flowchart of DoE

수 값과의 비교하여 최종 실험 결과에 대한 신뢰성을 판단했다.

실험계획법을 실시할 때 인자들의 실제 물리값을 사용하면 인자들 간의 영향도 차이를 알기 힘들고 회귀 방정식의 계수값에 큰 차이가 발생할 수 있으므로 3 수준일 경우 인자들은 -1(작음), 0(중간), 1(큼)의 값으로 표준화하여 사용했고 2 수준일 경우 -1(작음), 1(큼)의 값을 사용했다.[8] 오차범위 5% 내에서 실험계획법 프로그램을 이용하여 계산 결과를 분석하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 '2^k 부분 요인배치법'을 통한 영향도 분석

'2k 부분 요인배치법'을 통해서 엔진 내의 9가지 반응 변수에 대한 12가지 인자들의 영향도를 파악할 수 있었으며 Table 6 ~ Table 8은 엔진 속도 1500, 3000, 4500 rpm에서 나타난 결과를 각각 보여준다. 영향도의 크고 작음은 인자들간의 상대적인 값이며

Table 6 Influence of the variation of the different terms on the response function at 1500rpm

Degree of Effect - Very Large ***** / Large **** / Middle *** / Low ** / Very Low *

	Power	BSFC	Vol.Effi	Fuel flow	Air flow	In.Pre	Ex.Pre	In.Temp	Ex.Temp
CA50	****	*****	**	**	**	*	***	**	****
BDUR	–	–	–	–	–	–	–	**	–
P.T.temp	**	*	***	***	***	**	*	**	*
C.L.temp	***	**	****	****	****	***	**	****	**
C.H.temp	**		***	***	***	**	*	***	*
Valve.Co	*	–	**	**	*	–	*	***	–
H.C.In	–	–	–	–	–	–	–	**	–
H.C.En	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
H.C.Ex	**	–	***	***	***	**	***	**	–
F.C.In	***	–	*	*	–	***	–	**	–
F.C.En	–	***	–	–	–	*	–	**	–
F.C.Ex	–	–	–	–	–	–	**	**	–

Table 7 Influence of the variation of the different terms on the response function at 3000rpm

Degree of Effect - Very Large ***** / Large **** / Middle *** / Low ** / Very Low *

	Power	BSFC	Vol.Effi	Fuel flow	Air flow	In.Pre	Ex.Pre	In.Temp	Ex.Temp
CA50	*****	*****	–	–	–	*	****	**	****
BDUR	*	–	–	–	–	–	–	**	–
P.T.temp	**	–	***	***	***	***	*	*	*
C.L.temp	***	*	****	****	****	****	**	*	**
C.H.temp	**		***	***	***	***	*	*	*
Valve.Co	–	–	**	*	**	**	–	***	–
H.C.In	–	–	–	–	–	–	–	*****	–
H.C.En	*****	****	*****	*****	*****	*****	*****	****	*****
H.C.Ex	*	–	–	–	–	*	*****	**	–
F.C.In	–	–	–	–	–	***	–	**	–
F.C.En	****	****	–	–	–	–	–	***	–
F.C.Ex	–	–	–	–	–	–	***	**	–

Table 8 Influence of the variation of the different terms on the response function at 4500rpm

Degree of Effect - Very Large ***** / Large **** / Middle *** / Low ** / Very Low *

	Power	BSFC	Vol.Effi	Fuel flow	Air flow	In.Pre	Ex.Pre	In.Temp	Ex.Temp
CA50	*****	*****	–	–	–	*	****	**	****
BDUR	*	–	–	–	–	–	–	**	–
P.T.temp	**	–	***	***	***	***	*	*	*
C.L.temp	***	*	****	****	****	****	**	*	**
C.H.temp	**		***	***	***	***	*	*	*
Valve.Co	–	–	**	*	**	**	–	***	–
H.C.In	–	–	–	–	–	–	–	*****	–
H.C.En	*****	****	*****	*****	*****	*****	*****	****	*****
H.C.Ex	*	–	–	–	–	*	*****	**	–
F.C.In	–	–	–	–	–	***	–	**	–
F.C.En	****	****	–	–	–	–	–	***	–
F.C.Ex	–	–	–	–	–	–	***	**	–

실험계획법 프로그램에서 보여지는 결과값을 사용하여 비교했다. '2k 부분 요인배치법'은 2 수준에서 결과값을 분석하기 때문에 반응 변수에 대한 12가

지 인자들의 영향이'크다(1),'작다(-1)' 만을 파악 할 수 있지만 적은 실험 횟수에서도 핵심 인자를 효율적으로 파악할 수 있다. 12가지 인자 중 Engine Heat Coefficient는 세가지 속도에서 모든 반응 변수에 대해 가장 큰 영향을 미치지만 직접적으로 변화 시킬 수 있는 인자가 아니기 때문에 핵심인자로 선택하지 않았다. CA50는 Engine Heat Coefficient 다음으로 엔진에 큰 영향을 미치는 인자이며 Valve Coefficient와 Exhaust Manifold Heat Coefficient는 다른 인자들에 비해 비교적 반응 변수에 영향을 많이 미치는 인자들로 나타났다. Piston Top Temperature, Cylinder Liner Temperature, Cylinder Head Temperature 실린더 내의 온도 상태를 나타내는 인자들이다. 세가지 인자들 중에서 반응 변수에 대한 영향도가 큰 Cylinder Liner Temperature, Piston Top Temperature를 핵심 인자로 선택하여 실린더 내의 온도 상태가 엔진 성능에 미치는 관계를 알아보고자 하였다.

3.2 2차 식의 회귀 분석

인자의 수가 다섯 개인 경우 한 반응변수에 대하여 2차 식은 (1) 식과 같은 형태로 나타낸다.

$$r(f_1,f_2,f_3,f_4,f_5)=af_1+bf_2+cf_3+df_4+ef_5+ff_1f_1+gf_2f_2+hf_3f_3+if_4f_4+jf_5f_5+kf_1f_2+lf_1f_3+mf_1f_4+nf_1f_5+of_2f_4+pf_2f_4+qf_2f_5+rf_3f_4+sf_3f_5+tf_4f_5+u \quad (1)$$

여기서 f_1은 CA50, f_2는 C.L.temp, f_3는 P.T.temp, f_4는 Heat.Co, f_5는 Valve.Co를 나타낸다. a~u는 각 항의 회귀 계수를 의미하며 이를 통하여 반응변수에 미치는 인자들의 영향과 상호 작용의 크기를 알 수 있다. Table 9는 실험계획법을 통해 얻은 회귀계수에 대한 한 예로써 3000rpm에서 Power에 대한 2차 식의 회귀계수를 나타낸다. 2차 식의 회귀분석은 오차범위 5% 내에서 실시했기 때문에 반응변수들의 변동을 95%이상 반영하고 있다.[2)]

3.3 회귀 방정식의 계수 분석

실험계획법을 통해 구한 2차 식의 회귀 계수들을 분석함으로써 다섯 가지 인자들이 세가지 반응변수에 얼만큼 영향을 미치는지 Power에 영향 정량적·정성적으로 알 수 있으며 상호작용의 크기도 알 수 있다.[8)] 회귀계수는 부호에 상관없이 계수의 절대값이

Table 9 Coefficient of regression

Coefficient	Power	BSFC	Vol.Effi
a	-1.2264	0.008609	-0.00003
b	-0.6234	0.000323	-0.00421
c	-0.2865	-0.00024	-0.00113
d	0.0988	-6.2E-05	-0.00161
e	0.3316	-0.00053	0.00346
f	-0.1313	0.001101	-0.00205
g	0.0411	-0.00013	-0.00205
h	0.023	-4.4E-05	-0.00148
i	0.0278	0.000011	-0.00196
j	-0.0528	0.000044	-0.00305
k	-0.2806	0.00003	-0.00005
l	-0.2786	0.000032	0.00087
m	0.2828	0.000011	0.00069
n	0.2916	0.000006	-0.00019
o	0.2829	0.000005	-0.00001
p	-0.2856	0.00002	-0.00004
q	-0.2822	0.000022	0.00003
r	-0.2758	0	0.00083
s	-0.2906	0.000002	-0.00087
t	0.2847	0.000004	-0.00044
u	74.8033	0.452224	1.00682

클수록 영향도가 큰 것을 의미하며, 반응변수에 대한 영향도의 크기 차이를 쉽게 비교하기 위해 계수의 절대값을 사용하여 그래프로 나타냈다. 그래프를 통해 어떤 인자가 특정 반응변수에 얼마나 영향을 미치는지 쉽게 판별 할 수 있고, 각 rpm에 따른 인자들의 거동을 예측할 수 있다. Fig. 3 ~ Fig. 5는 엔진 속도 1500, 3000, 4500rpm 에서 Power에 관한 2차 식의 회귀계수를 그래프로 나타낸 것이다. Power에 영향을 많이 미치는 인자는 CA50, C.L.temp, Valve.Co이다. CA50 는 한 실린더 내에 들어오는 연료와 공기가 50% 연소했을 때의 크랭크 각도로써 발생 시점은 Power와 밀접한 관련이 있다. CA50 시점이 적절할수록 연소에 의해 발생하는 일과 피스톤 압축일 사이에서 발생하는 손실이 줄어들어 Power 는 증가한다. 엔진 속도가 증가 하면 엔진 실린더 내의 온도가 증가하고 C.L.temp 값이 커지고, 온도가 높을수록 실린더 내로 들어오는 예혼합된 공기가 많이 팽창된다. 예혼합된 공기가 팽창되면 실린더 내로 들어오는 공기의 양이 줄어들면서 체적 효율이 떨어지고 Power에 영향을 준다. C.L.temp는 저속에서부터 엔진 속도가 높아질 경우 고속에서 엔진속

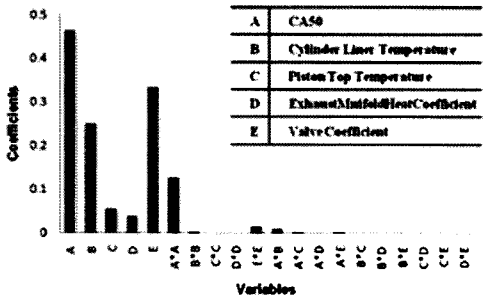

Fig. 3 Influence of the variation of the different terms on the response function about Power at 1500rpm

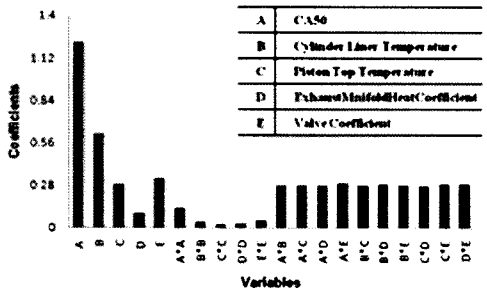

Fig. 4 Influence of the variation of the different terms on the response function about Power at 3000rpm

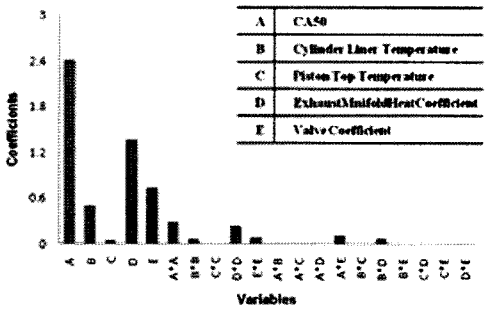

Fig. 5 Influence of the variation of the different terms on the response function about Power at 4500rpm

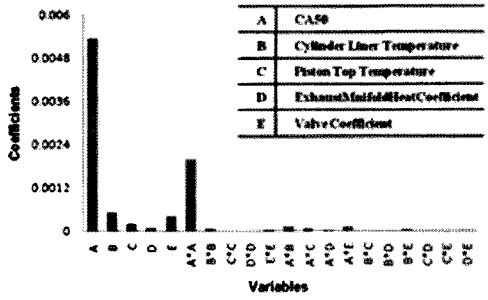

Fig. 6 Influence of the variation of the different terms on the response function about BSFC at 1500rpm

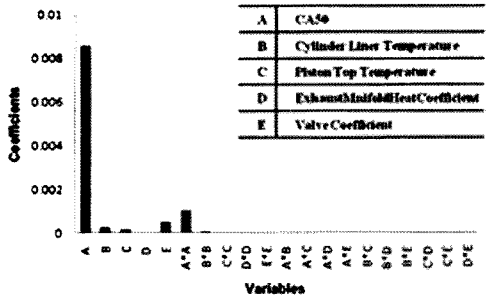

Fig. 7 Influence of the variation of the different terms on the response function about BSFC at 3000rpm

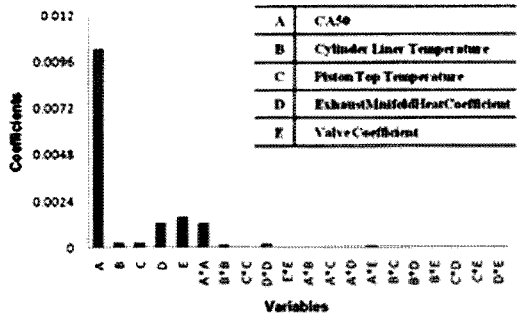

Fig. 8 Influence of the variation of the different terms on the response function about BSFC at 4500rpm

도가 빨라질 때 보다 빠르게 증가하기 때문에 예혼합된 공기의 팽창이 급격히 발생하며 그만큼 Power에 대한 영향은 커진다. Valve.Co는 실린더 내로 들어 오는 예혼합된 공기량과 직접적인 관련이 있다. 엔진 속도에 따라 밸브가 개폐기간이 달라지면서 예혼합된 공기의 양이 달라지고 개폐기간이 고속에서보다 저속에서 더 길기 때문에 1500rpm에서 Power에 대한 Valve.Co의 영향이 크다. 3000rpm을 제외한 나머지 속도에서는 인자들의 상호작용이 일어나지 않았으며 엔진 속도 3000rpm에서 Power을 증가시키고자 할 경우 모든 인자들의 값을 동시에 고려해야 한다.

Fig. 6 ~ Fig. 8은 엔진속도 1500, 3000, 4500rpm에서 BSFC에 관한 2차 식의 회귀계수를 그래프로 나타낸 것이다. BSFC는 모든 속도에서 CA50만 주된 영향을 주며 상호작용은 일어나지 않는다. CA50시점이 적절하면 연소 효율이 증가하고 연소일과 피스톤 압축일 사이에서 발생하는 일의 손실이 줄어

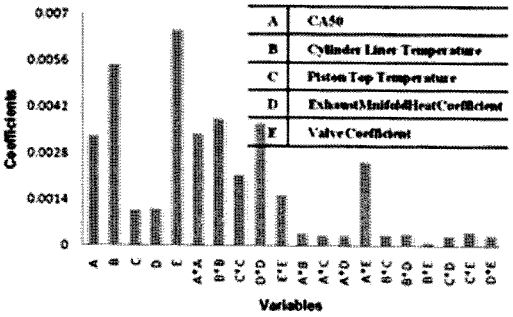

Fig. 9 Influence of the variation of the different terms on the response function about Volumetric efficiency at 1500rpm

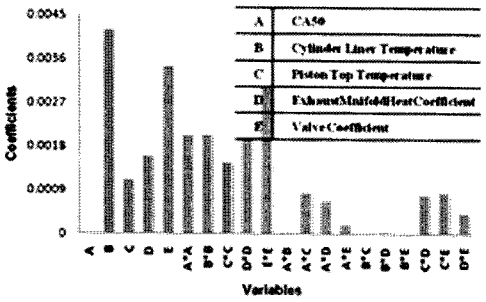

Fig. 10 Influence of the variation of the different terms on the response function about Volumetric efficiency at 3000rpm

들면서 제동일이 커지므로 BSFC가 작아진다.

Fig. 9 ~ Fig. 11은 엔진속도 1500, 3000, 4500rpm에서 Volumetric efficiency에 관한 2차 식의 회귀계수를 그래프로 나타낸 것이다. Power와 BSFC에 주된 영향을 줬던 CA50는 1500rpm에서만 Volumetric efficiency에 영향을 주었다. C.L.temp는 1500, 3000 rpm에서 그리고 Valve.Co는 모든 속도에서 Volumetric efficiency 대한 영향이 크다. Heat.Co는 속도가 증가할수록 커지며 4500rpm에서 영향도가 가장 크다. C.L.temp와 Valve.Co는 실린더 내부로 들어오는 예혼합기 양과 관련이 있다. C.L.temp가 작고 Vavle.Co가 크면 크면 실린더에 들어오는 예혼합기 양이 늘어나고 그만큼 Volumetric efficiency가 증가하며 특히 Valve.Co는 유입되는 예혼합기 양과 직접적으로 관련되기 때문에 모든 속도에서 그 영향을 확인할 수 있다. 하지만 속도가 증가하면 실린더내의 온도가 일정해지기 때문에 고속에서는 C.L.temp 영향이 저속에서 보다 작다.

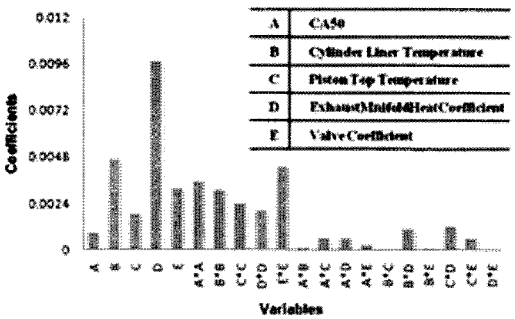

Fig. 11 Influence of the variation of the different terms on the response function about Volumetric efficiency at 4500rpm

3.4 단일 반응 변수의 특성을 고려한 최적화방정식의 계수 분석

3.4.1 단일 반응 변수 최적화

중심 합성법에서 구한 2차 식을 실험계획법 프로그램으로 분석하여 '단일 반응변수 최적화'를 시도할 수 있다. '단일 반응변수 최적화'는 하나의 반응변수의 특성을 최대로 고려하여 인자들의 최적공정조건을 구하는 방법으로 실험목적에 따라 특정 반응변수 특성을 극대화 시킬 때 쓰인다.[3] 하지만 '단일 반응 최적화'는 다른 반응변수의 특성은 고려하지 않은 상태에서 해당 반응변수의 특성을 최대화 시키기 때문에 전체적인 엔진성능 향상에 관해서는 최적공정조건이 아닐 수 있다. Table 10은 세가지 속도에서 Power와 Volumetric efficiency는 크면 클수록 좋은 경우인 망대특성을 적용하고 BSFC는 작으면 작을수록 좋은 경우인 망소특성을 실험계획법에

Table 10 Single response optimization

rpm	Factor	Value
1500	Power [hp]	34.06
	BSFC [kg /kWh]	0.45
	Volumetric Efficiency	0.88
3000	Power [hp]	90.59
	BSFC [kg /kWh]	0.43
	Volumetric Efficiency	1.01
4500	Power [hp]	125.44
	BSFC [kg /kWh]	0.45
	Volumetric Efficiency	1.21

적용한 상태에서 '단일 반응변수 최적화'를 통해 구한 결과이다.

3.4.2 다중 반응 변수 최적화

3.4.1에서는 단일 반응변수에 대해서만 최적화고려했지만 일반적으로 특정 반응변수에 최적인 공정조건은 다른 반응변수 측면에서 보면 최적이 아닐 수 있다.[3] 여러 개의 반응변수를 동시에 최적화하는 방법을 '다중 반응변수 최적화'라고 하며 다수의 반응변수들간의 타협점을 찾을 수 있다. 본 연구에서는 세가지 반응변수가 존재하며 전체적인 엔진성능의 향상을 위해, 실험계획법 프로그램에 있는 '다중 반응변수 최적화'를 사용하여 인자들과 반응변수들간의 최적공정조건을 찾았다. '다중 반응변수 최적화'는 '단일 반응변수 최적화'때와 동일하게 중심합성법에서 구한 2차 식을 사용하였다. Table 11은 각 rpm에서 '다중 반응변수 최적화'를 통해 얻은 세가지 반응변수의 결과이며 Tablel 12는'다중 반응변수 최적화'를 위한 인자들의 최적공정조건 값이다.

Table 11 Single response optimization

rpm	Factor	Value
1500	Power [hp]	33.06
	BSFC [kg /kWh]	0.45
	Volumetric Efficiency	0.87
3000	Power [hp]	79.45
	BSFC [kg /kWh]	0.44
	Volumetric Efficiency	1.01
4500	Power [hp]	125.44
	BSFC [kg /kWh]	0.45
	Volumetric Efficiency	1.18

Table 12 Variables in optimal response condition

rpm	Factor	Value
1500	CA 50 [deg]	12.46
	C.L.temp [℃]	381.16
	P.T.temp [℃]	659.98
	Heat.Co	1.34
	Valve.Co	Low
3000	CA 50 [deg]	14.33
	C.L.temp [℃]	373.93
	P.T.temp [℃]	623.95
	Heat.Co	1.09
	Valve.Co	Middle
4500	CA 50 [deg]	9.86
	C.L.temp [℃]	365.54
	P.T.temp [℃]	615.54
	Heat.Co	1.37
	Valve.Co	High

3.5 WAVE를 통한 확인 실험

실험계획법에서 구한 결과는 통계적 절차를 통해 구했기 때문에 100% 정확하지 않다. 하지만 실험계획법 프로그램은 회귀식이 100% 맞는다는 가정 하에서 회귀 분석하여 답을 준 것으로, 최적화를 시도하여 얻은 결과값에 대해 확인실험이 필요하다.[3] 실험계획법을 통해 얻은 결과의 정확성 확인을 위해 '다중 반응변수 최적화'에서 얻은 Table 7의 최적공정조건 인자 값을 WAVE에 다시 대입하여 시뮬레이션하고 세가지 반응변수 값을 구했다. WAVE를 통해 얻은 반응변수 값을 Table 10에 있는 '다중 반응변수 최적화'상태에서 구한 결과값과 비교하여 얼마나 일치하는지 확인했다. Table 13은 WAVE를 통해 얻은 반응변수의 결과값과 실험계획법에서 얻은 반응변수의 결과값을 비교하여 얻은 것으로 비율이 높을수록 두 결과가 일치함을 나타낸다. 4500 rpm에서 Volumetric efficiency (약 92%)를 제외한 모든 값에서 97%이상 일치했으며 실험계획법을 이용해 얻은 모든 결과들은 신뢰할 수 있음을 보여준다.

동일한 조건하에서 WAVE 시뮬레이션을 통해 얻은 반응변수의 결과값과 실험계획법에서 얻은 반응변수의 결과값이 97%이상 일치하므로 본 연구에서 설계된 실험 계획법에 위의 세가지 반응변수 외에 특성을 알고자 하는 반응변수를 추가적으로 적용할 수 있으며 인자들의 종류와 범위도 변화시킬 수 있다.

Table 13 Accordance of Variables between WAVE and DoE

rpm	Power	BSFC	Vol.Effi
1500	98.45 %	99.56 %	98.99 %
3000	97.08 %	99.99 %	99.58 %
4500	99.6 %	99.94 %	92.92 %

4. 결 론

직렬4기통 SI 엔진성능의 최적화를 최소의 비용과 최소의 실험횟수로 얻기 위해 실험계획법을 적용한 WAVE 시뮬레이션 계산을 실시하였다. 최적화를 시도한 세가지 반응변수는 Power, BSFC, Volumetric efficiency이고 반응변수 관한 다섯 가지 핵심인자는 CA50, Cylinder liner temperature, Piston top temperature, Exhaust manifold heat coefficient, Valve coefficient이다.

1) CAE프로그램인 WAVE를 이용한 엔진 모델링을 통해 실험 장치 구성과 성능 실험에 필요한 시간과 비용을 줄이고, 프로그램 내에서 엔진성능에 관련된 인자들의 종류와 범위를 비교적 쉽게 변화시킴으로써 결과를 효율적으로 구할 수 있었다.
2) 실험계획법을 통해 최적화 하고자 하는 엔진성능에 크게 영향을 주는 다섯 가지 핵심 인자를 찾고, 가정된 회귀식의 회귀분석을 통해 반응변수에 대한 인자들의 영향도 평가 및 세가지 반응변수를 최적화 하였다.
3) '2k 부분 요인배치법'과 '중심 합성법'을 통한 두 번의 반응 변수에 대한 인자들의 영향도 평가에서 유사한 결과를 확인 했으며 Power의 경우 CA50, C.L.temp, Heat.Co, BSFC의 경우 CA50, Volumetric efficiency의 경우 C.L.temp, Heat.Co, Valve.CO 가 주요 인자로 나타났다.
4) Power의 경우 CA50는 모든 엔진 속도에서 영향이 가장 컸으며 속도가 증가할수록 C.L.temp 영향은 줄어들고 Valve.Co 영향은 증가되었다.
5) BSFC의 경우 CA50 만이 모든 엔진 속도에서 크게 영향을 줬으며, Power를 상승시키고 BSFC를 감소시키기 위해서는 CA50의 발생 시점이 중요함을 확인했다.
6) Volumetric efficiency의 경우 CA50를 제외한 나머지 네 개의 인자들이 골고루 영향을 주었으며 열 전달과 관련된 C.L.temp와 Heat.Co와 예혼합된 공기량과 관련된 Valve.Co의 영향이 컸다.
7) 실험계획법을 통해 얻은 최적화된 반응변수의 결과와 최적공정조건 상태의 인자 값을 WAVE에 대입하여 얻은 반응변수 값을 비교한 결과, 약 97%이상 일치했으며, 이것은 실험계획법에서 얻은 결과를 신뢰할 수 있음을 나타낸다. 또한 특성을 알고자 하는 새로운 반응변수를 본 실험에서 설계한 실험계획법에 적용하여 파악할 수 있음을 보여준다.

후 기

본 연구는 '2009울산지방과학연구단지 위탁공동연구개발사업'의 일환으로 수행되었습니다. 또한, 연구에 도움을 주신 (주)세종공업의 김상호, 정종화 그리고 노진석님께 감사드립니다.

References

1) J. F. O'Connor, C. L. White and M. R. Charnley, "Optimizing CFD Prediction of Diesel Engine Combustion and Emissions Using Design of Experiments: Comparison with Engine Measurements," SAE 982458, 1998.
2) E. R. Moen, R. D. Moen and T. R. Young, "DOE for Accelerated Learning and Better Vehicle Performance," SAE 983021, 1998.
3) S. H. Lee, Minitab을 이용한 공학 통계 자료분석, 이레테크, pp.647-778, 2008.
4) Ricardo, WAVE Software User Manual and Tutorial, RICARDO, 2006.
5) D. H. Kim, D. Diganta, T. Ganbold and O. T. Lim, "A Simulation for Identifying Influence of The VVT Effect on the SI Engine Performance using WAVE," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.164-169, 2008.
6) X. P. Liu and S. Y. Jiang, "A DOE Based Approach to Multi-Response Optimization," SAE 2003-01-0880, 2003.
7) S. B. Lee, 미니탭 15버전을 활용한 예제 중심의 실험계획법, 이레테크, pp.195-318, 2008.
8) D. B. Jeong, J. H. Bang and K. D. Min, "A Study on the Optimization of Operating Variables in a Diesel Engine by Design of Experiments," Spring Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.292-297, 2008.