

커먼레일 디젤엔진의 흡배기밸브 타이밍 개선을 통한 연비절감에 대한 수치해석적 연구

김승철[†] · 김청균

홍익대학교 트리보메카, 에너지기술 연구센터

(2017년 6월 5일 접수, 2017년 6월 19일 수정, 2017년 6월 21일 채택)

A Numerical Analysis for Fuel Consumption by Improvement of Intake/Exhaust Valve Timing in a Common Rail Diesel Engine for a Generator

Seung Chul Kim[†] · Chung Kyun Kim

Research Center for Tribology, Mechatronics and Energy Technology, Hongik University

(Received 7 June 2017, Revised 20 June 2017, Accepted 22 June 2017)

요 약

본 연구에서 사용되는 발전기용 커먼레일 디젤엔진은 흡배기 밸브의 작동을 위해 기계적으로 구동되는 캠축을 이용하고 있으며, 차량 운전조건 알맞게 밸브의 개폐시기가 고정되어 있다. 그러나 발전기용 엔진은 회전속도가 일정하고 부분부하에서 운전된다. 따라서, 발전용 커먼레일 디젤엔진의 최적화 설계를 위해 밸브 타이밍의 변화에 따른 디젤연소와 배출가스의 특성을 고찰하여 연비 측면에서 계산하였다. 디젤엔진의 밸브 타이밍은 흡배기 유동을 변화시킴으로서 연소특성에 영향을 주었으며 발전기의 연비 개선이 가능하다고 판단되었다.

주요어 : 흡배기 밸브 타이밍, 커먼레일 디젤엔진, 발전기, 수치해석

Abstract - The common rail diesel engine used in this study uses mechanically driven camshaft for the operation of intake and exhaust valves, and the timing of valve opening and closing is fixed according to the operating conditions of the vehicle. However, the electric generator engine operates at a constant speed and partial load. Therefore, in order to optimize the design of common rail diesel engine for power generation, the characteristics of diesel combustion and emissions according to the change of valve timing were examined and calculated in terms of fuel economy. The valve timing of the diesel engine influenced the combustion characteristics by changing the intake and exhaust flow and it was considered that the fuel efficiency of the generator could be improved.

Key words : Intake and Exhaust valve timing, Common rail diesel engine, Electric generation, Numerical analysis

1. 서론

현재 시중에 판매되는 엔진발전기는 차량용 엔진을

거의 그대로 사용하여 발전기 운전조건에 적합하도록 설계과정이 제대로 진행되지 않아서 연비나 배출가스 측면에서 개선을 여지를 남기고 있다. 특히 중소형 엔진발전기에 채용되고 있는 대부분의 엔진은 선박용이나 차량용으로 개발된 사양을 그대로 구입해서 장착되고 있는 실정이므로 선박이나 차량에 비해 정속, 저

[†]To whom corresponding should be addressed.
Tel : 02-320-1426 E-mail : ksc8932@hanmail.net

부하 상태로 운전되는 발전시스템의 특성으로 인해 효율에 대한 개선의 여지가 충분히 많음을 알 수 있다. 특히, 엔진의 흡·배기 시스템의 경우도 차량 운전 조건에 비해 엔진발전기에 적합한 설계변경이 요구된다. 일반적으로 피스톤이 상사점(TDC)에 있을 때 흡기밸브가 열려 흡기가 일어나고, 피스톤이 하사점에 있을 때 배기밸브가 열려 배기가 일어나는 것이 이상적이지만 연소가스 및 공기는 질량을 가진 관성력이 존재하기 때문에 흡배기 타이밍 조절이 필요하다. 흡기 타이밍의 경우 일반적으로 IVO(intake valve open)는 TDC 이전에 일어나고 IVC(intake valve close)는 BDC 이후에 일어난다. 또한, 배기 타이밍의 경우도 앞에서 말한 요인들에 의해서 개폐시기를 정하는데 이러한 밸브의 개폐시기를 밸브 타이밍(valve timing)이라고 한다. 이러한 밸브 타이밍은 캠의 형상에 지배를 받으며 캠은 엔진의 크랭크 회전 속도에 맞춰서 회전하고 밸브의 개폐를 조절한다. 이러한 캠 형상은 자동차의 경우 특정 회전수에 최적화되도록 설정되어 있다. 한편, 발전기용 엔진운전 조건은 정속운전이며 자동차 운전조건에 비해 부하도 50% 이하에서 대부분 진행이 된다. 따라서, 흡배기 밸브 타이밍에 따른 최대 체적효율이 발전기용 엔진의 회전수에서 발생되도록 하는 것이 필요하게 되었다. 따라서, 본 연구에서는 밸브 타이밍의 변화에 따른 엔진의 연비와 배출가스의 영향을 살펴보고자 상용되는 2.9L 디젤엔진을 대상으로 실험과 수치해석을 수행하였다. 최근에 엔진 밸브 타이밍 개선을 위한 연구로 실험에서 구현하기 어려운 흡·배기 밸브 타이밍의 변화가 엔진 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 시뮬레이션을 진행되었다.⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾ 이러한 결과값을 엔진해석 상용코드인 ANSYS v18 CFX code(이하 ANSYS CFX)에 입력값으로 취하였다. 또한, ANSYS CFX에서는 엔진 흡·배기 밸브 타이밍 변화에 대해 엔진연소에 따른 열효율을 계산하여 엔진발전기 부분부하에서 흡·배기 밸브 타이밍 재조정을 통하여 연료소비량 개선에 관한 결과를 조사하고자 한다.

2. 수치모델

2-1. 연료분사계 모델

연료분사계의 제원과 개략도는 Table 1과 Fig. 1과 같으며 고압공급펌프, 축압실, 분사노즐 및 파이프의 4부분으로 나누었으며, 공급펌프, 축압실 및 노즐부의 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 먼저, 플

런저의 변위로 인한 유량은 플런저실 압축성, 딜리버리실로 흐르는 유량, 그리고 딜리버리 밸브의 움직임으로 인한 체적변화의 합과 같고,

$$U_p A_p = \frac{V_p dP_p}{\beta_p dt} + C_d A_d \sqrt{2(P_p - P_d)/\rho} + A_d \frac{dx_d}{dt} \tag{1}$$

플런저실로부터 딜리버리실로 들어온 유량과 밸브 변위에 의한 체적차이는 딜리버리실의 압축성과 파이프로 나간 유량의 합과 같으며,

$$C_d A_d \sqrt{2(P_p - P_d)/\rho} + A_d \frac{dx_d}{dt} = \frac{V_d dP_d}{\beta_d dt} + U_i A_i \tag{2}$$

파이프를 통해서 들어온 유량은 축압실의 압축성과 압력조절기로 나간 유량의 합과 같다

$$U_i A_i = C_{noz} A_{noz} \sqrt{2(P_{noz} - P_{cyl})/\rho} C_{noz} + A_{noz} \sqrt{2(P_{noz} - P_{con})/\rho} + \frac{V_{noz} dP_{noz}}{\beta_{noz} dt} + A_{noz} \frac{dx_{noz}}{dt} \tag{3}$$

또한, 노즐실에서 콘트롤 밸브실로 들어온 유량은 콘트롤 밸브실 압축성과 스펴실로 나간 유량의 합과 같다.

Table 1. Specifications of fuel injection system.

Nozzle type	Mini Sac
Spray Angle	150 deg
Nozzle Hole diameter	0.16 cm
Number of Nozzle Hole	8



Fig. 1 Component of fuel injection system

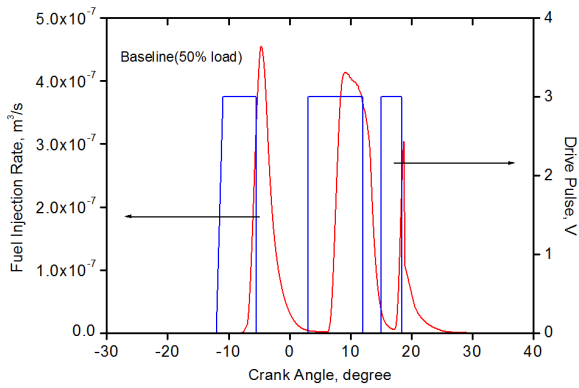


Fig. 2 Results of injection system simulation

$$C_{con} A_{con} \sqrt{2(P_{noz} - P_{cont})/\rho} = \frac{V_{con} dP_{con}}{\beta_{con} dt} + C_{sp} A_{sp} \sqrt{2(P_{con} - P_{sp})/\rho} \quad (4)$$

또한, 공급펌프와 노즐부의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_{noz} \frac{d^2 x_{noz}}{dt^2} + C_{noz} \frac{dx_{noz}}{dt} + k_{noz} (x_{noz} + x_{noz-ini}) = A_{need} P_{noz} - A_{noz} P_{con} \quad (5)$$

2-2. 연소모델

연소실내 연소해석을 위해 3D 모델링을 진행하였고 계산을 위한 격자는 ANSYS CFX에 내장된 격자 생성 프로그램을 이용하여 생성하였으며, Table 2에서 보는 바와 같이 연소모델에 필요한 설정을 정하였다. 또한, 현재 정확한 diesel 연료에 대한 상세 화학 반응 mechanism이 없기 때문에 본 연구에서는 디젤연료의 chemistry를 대신해 디젤과 세탄가가 비슷한 n-heptane의 skeletal 메커니즘이 사용되었다.⁽⁶⁾

3. 연구절차

3-1. 실험방법

Fig. 3과 Table 3의 실험장치를 설치를 통해 실험은 Table 4와 같은 실험조건으로 냉각수 및 오일온도를 80±2℃, 흡기압과 배기압을 2,400rpm에서 각각 -350mmH2O, 150mmHg의 조건으로 기본적인 연소실 형상에 대하여 부분부하 조건에서 실린더내 압력값을 측정하였다. 연소압력 측정은 피에조식 압력변환기 (AVL, QC32C-E)를 그 끝단이 연소실의 Bowl 가장

Table 2 Input conditions in Combustion model

Model	Diesel unsteady flamelet	
Chemistry	Chemkin file	
Boundary	Species composition	O ₂ , N ₂ , CO ₂ , H ₂ O
Injection	Timing and quantity	Calculated Data
	Droplet Diameter(m)	0.1415e-3
	Cone radius(m)	0.0845e-3
Cylinder	Chamber wall temp.(K)	440
	Piston temp.(K)	560
	Gauge pressure(MPa)	0.26
	Cylinder Temp.(K)	404

Table 3. Engine specifications

Injection Type	Direct Injection
Induction Type	Turbo Charger
Displacement Volume(cc)	2902
Bore × Stroke(mm)	97.1 × 98
Compression Ratio	17.5
EVO/EVC	BBDC 45°/ATDC 30
IVO/IVC	BTDC 30°/ABDC 45°
Max. Torque(N·m)	333 at 2,200rpm
Max. Power(kW)	110 at 4,100rpm

Table 4. Experimental conditions

Engine Speed(rpm)	2,400
Load(%)	25, 50
Drive Pulse Timing	712.0-738.2 C.A.,deg

자리에 오도록 설치하여 그 출력신호를 연소해석장치 (AVL, D/A 657)에 보내어 기록하였으며 연소압력 데이터는 100사이클을 평균치로 나타내었다.



Fig. 3 Experimental apparatus

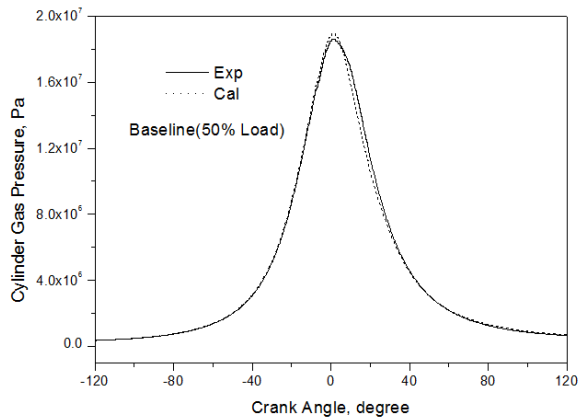


Fig. 4 Comparison of calculation and experiment results

3-2. 실험과의 비교를 통한 모델 검증

Fig. 5는 본 연구에서 코딩하여 계산된 연료분사계 수치해석 결과를 보여주며 이러한 연료분사 데이터를 입력값으로 취하여 ANSYS CFX에서 실린더내 시간에 따른 연료분사율을 계산하였다. 또한, Fig. 6은 연료분사계 프로그램과 ANSYS CFX에서 계산된 결과값에 대한 검증을 하기 위해 실험에서 취득된 실린더 압력을 상호 비교를 한 것으로 유사한 경향을 보여주고 있다.

3-3. 연소특성 예측

Table 5와 Fig. 7은 ANSYS CFX 엔진해석을 수행하기 위해 연료분사시기에 대한 입력값으로서 이러한 연료분사계 변수가 연소과정을 거쳐 최종적으로 연료 소비율에 미치는 영향을 파악하기 위해 앞의 2.1절에서 소개하는 연료분사계 모델과 ANSYS CFX 엔진해석 프로그램을 연동하여 수치해석을 실시하였다.

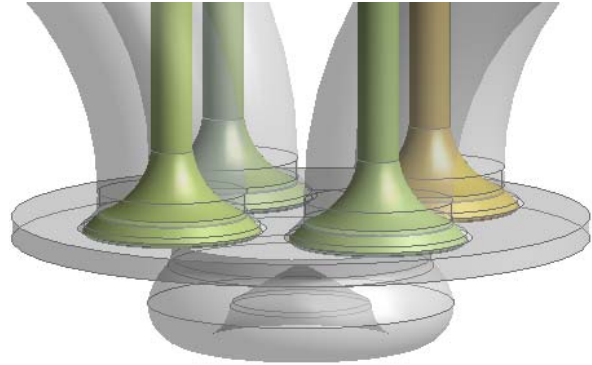


Fig. 5 Valve modeling

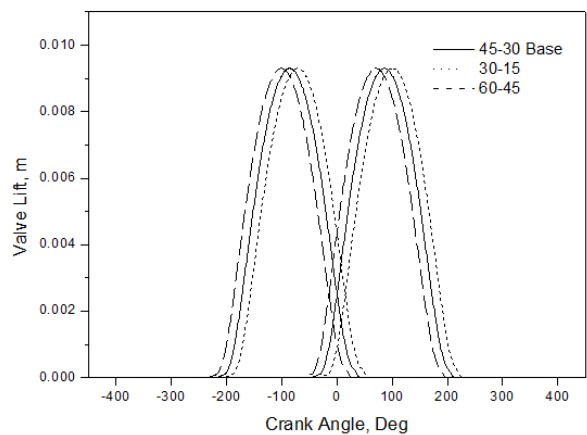


Fig. 6 Intake/Exhaust Valve curve with variable valve timing

Table 5. Input condition of Valve timing for calculations

Load	Valve Timing	
	EVO(BBDC)	IVO(BTDC)
25%	30	15
	35	20
	40	25
	45(Base)	30(Base)
	50	35
	55	40
50%	60	45
	30	15
	35	20
	40	25
	45(Base)	30(Base)
	50	35
	55	40
	60	45

4. 해석결과 및 고찰

발전기는 대부분 50% 이하 부하에서 운전하고 커먼 레일 엔진의 경우 효율성을 높이기 위해 높은 토오크가 형성되는 비교적 고속인 2,400rpm 정속운전이다. 그러나 본 연구에서 다루는 커먼레일 엔진은 고속디젤 엔진으로서 밸브 오버랩은 고속에서 효과적이므로 체적효율의 최대치는 2,400rpm보다 높은 속도에 맞추어져 있다. 따라서, 밸브 타이밍 개선을 통해 발전기용 엔진회전수인 2,400rpm에서 체적효율 최대값을 가져오도록 수치해석적으로 접근을 시도하는 것이다. 본 엔진의 EVO와 IVO 타이밍은 BBDC45°와 BTDC30°이며 밸브 타이밍 변경에 따른 효과를 알아보기 위해 Table 5와 같이 EVO와 IVO에 대하여 진·지각시키는 조건으로 부하 25, 50%에 대하여 각각 부여하였으며 Fig. 6은 부여된 조건의 일부를 보여준다. Fig. 7에서 9까지는 계산된 결과를 그래프로 보여주고 있으며, 이러한 결과를 종합적으로 분석하여 개선된 밸브 타이밍을 제시한 것이 Table 10이다. 이러한 그림과 표를 종합하여 분석하면, IVO를 증가시켜서 밸브 오버랩이 증가하면 잔류가스량이 증가하면서 PMEP가 감소되지만 IVC를 동시에 진각시켜 흡기말 역류를 감소시키게 하여 PMEP를 증가시키는 요인에 된다. 이러한 상충되는 현상은 밸브 오버랩이 어느 정도 이상으로 확보가 된다면 IVO에 의한 영향이 IVC의 영향보다 커지면서 비로소 Fig. 7과 같이 PMEP가 감소하게 된다. Fig. 7은 최적화된 밸브타이밍과 기존조건을 비교한 것으로 밸브타이밍 조정이 필요함을 알 수 있으며, 이러한 결과는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 열발생률에서도 확인할 수 있다. EVO를 지각시키면 EVC도 동시에 지각되어 잔류가스량은 증가하므로 PMEP가 감소되며, IVO를 진각하면 IVC가 함께 진각되면서 유효 압축비가 증가하여 연소안정화와 함께 연비향상에 도움을 준다. 따라서, 연비향상을 위해서는 IVO 지각하면서 최적의 연비 향상점을 찾아야 한다. Fig. 9는 밸브 타이밍에 따른 BSNO_x의 결과를 보여주는 것으로 밸브 오버랩이 증가하면 BSNO_x가 감소하고 동일한 밸브 오버랩의 조건이라면 EVO의 지각과 함께 EVC 지각이 증가할수록 BSNO_x가 감소한다. 이러한 경향은 밸브 오버랩이 증가하면서 내부 EGR량이 증가하게 되고, 밸브 오버랩이 동일한 조건의 경우 EVO를 지각과 동시에 EVC가 함께 지각함으로써 내부 EGR량이 증가하면서 이렇게 증가된 내부 EGR 효과에 의

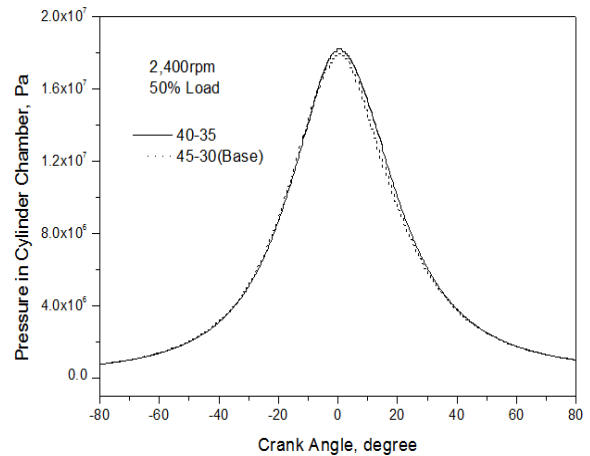


Fig. 7 Pressure in cylinder gas with variable injection timing

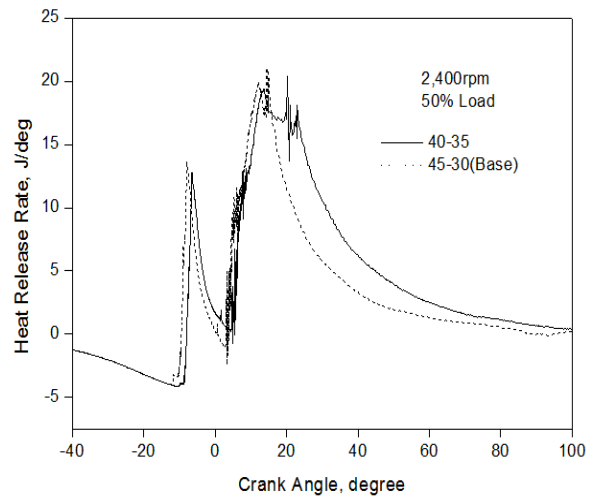


Fig. 8 Heat release rate with variable injection timing

해 BSNO_x가 감소하게 된다. Table 10은 밸브 타이밍을 변화시키면서 계산된 연비와 배출가스를 비교하여 가장 적합한 밸브 타이밍을 제시한 것이다. 상기의 분석결과와 같이 EVO는 지각시키고 IVO는 진각시키면서 밸브 오버랩을 증가시켜 연비 향상 및 배출가스 절감 측면에서 효과적인 자료를 제공하고 있다. 부하 50%에 비해 부하 25%의 경우 EVO이 더욱 진각된 것은 부하감소에 따른 배기온도 및 압력 감소로 인한 터보차저 효과가 감소와 더불어 공기유동 관성력의 감소를 만회하기 위해 밸브 오버랩을 증가시키는 결과로 분석된다.

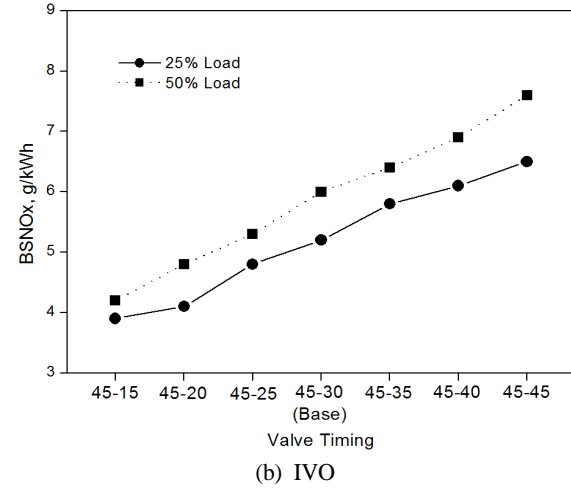
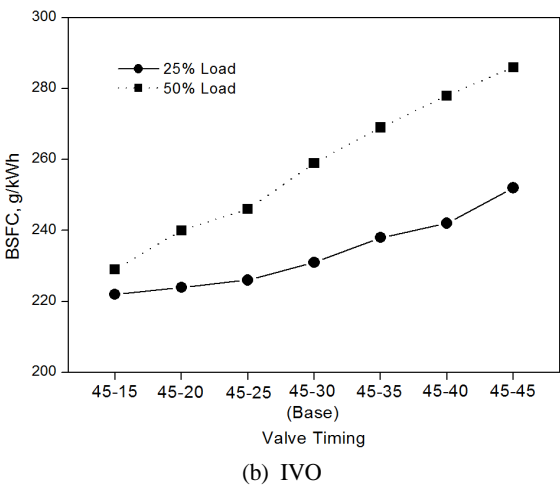
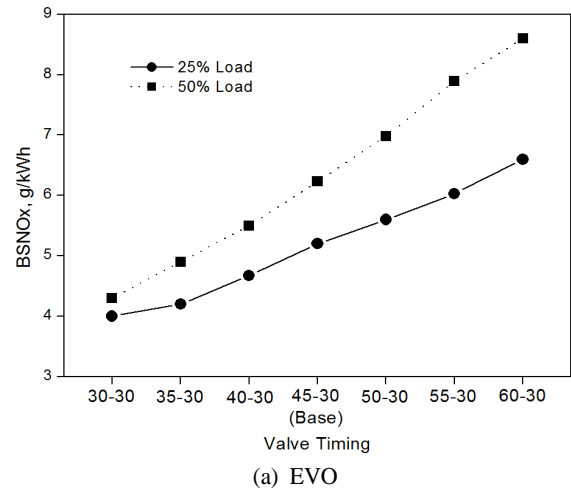
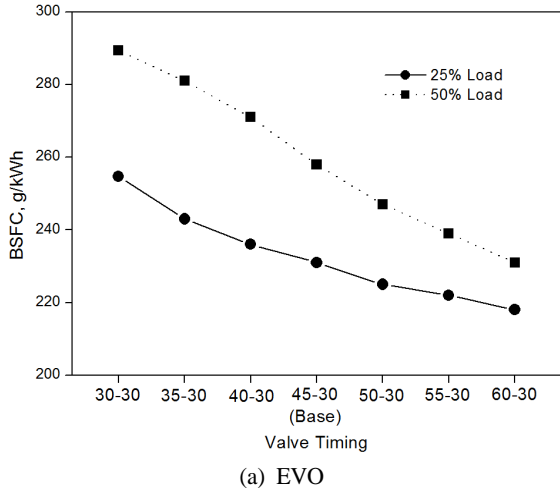


Fig. 9 Comparison BSFC with the parameters

Fig. 10 Comparison BSNOx with the parameters

5. 결론

발전기용 커먼레일 디젤엔진의 연비향상 및 배출가스 감소를 위해 기존 차량에 적용하였던 밸브타이밍을 개선하기 위해 실험과 수치해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 차량용으로 세팅된 디젤엔진을 정속운전을 하는 발전기용 엔진으로 변경함에 따라 밸브 타이밍의 재조정이 필요함을 알았다.
- (2) EVO를 지각시키면 잔류가스량은 증가하므로 PMEP가 감소되며, IVO를 진각하면 유효압축비가 증가하여 연소안정화와 함께 연비향을 향상시켰다.
- (3) EVO는 지각시키고 IVO는 진각시키면서 밸브 오버랩이 증가시키면 BSNOx가 감소하고 동일한 밸브

Table 6 Optimal valve timing calculated among the variations

Load	Valve Timing	
	EVO(BBDC)	IVO(BTDC)
25%	30	15
	35	20
	40	25
	45(Base)	30(Base)
	50	35
	60	45
50%	30	15
	35	20
	40	25
	45(Base)	30(Base)
	50	35
	60	45

■ : 최적화 변수

오버랩의 조건이라면 EVO의 지각이 증가할수록 BSNOx가 감소한다.

(4) 상기의 분석결과와 같이 EVO은 지각시키고 IVO는 진각시키면서 밸브 오버랩을 증가시켜 연비 향상 및 배출가스 절감 측면을 위한 효과적인 자료를 제공하였다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 산업통상자원부 산업기술혁신사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 감사드립니다.

사용기호

<i>A</i>	: Area (m ²)
<i>con</i>	: Control valve
<i>cyl</i>	: Cylinder
<i>d</i>	: Delivery valve
<i>ini</i>	: Initial
<i>l</i>	: Pipe line
<i>m</i>	: Mass (kg)
<i>need</i>	: Needle valve
<i>noz</i>	: Nozzle
<i>P</i>	: Pressure (Pa)
<i>p</i>	: Plunger
<i>U</i>	: Velocity (m/s)
<i>x</i>	: Displacement (m)

그리스 문자

β	: Bulk modulus of fuel
ρ	: Fuel density (kg/m ³)

References

1. Lee, Y. K., Seo, S. B., Kim, J. J., A Study on the Thermal Designs of 300MW-Class IGGCC Plant, Journal of Energy Engineering, Vol. 11, No. 2, pp. 81-89
2. Park, J. S., Lee, K. S., Kim, M. S., 2014, Numerical analysis of a dual-fueled CI(Compression ignition)engine using Latin hypercube sampling and multi-objective Pareto, International journal of Energy, 70, pp. 278-287
3. Yusaf, T. F., Buttsworth, D. R., Saleh, K. H., 2010, CNG-diesel engine performance and exhaust emission analysis with the aid of artificial neural network, International journal of Applied Energy, 87, pp. 1661-1669
4. Park, S. H., 2001, The Analysis and Experiments for the Design of Electro-mechanical Variable Valve Train System, Transaction of KSAE 9 (3), pp. 60 ~ 67
5. Nam, J. G., 2003, A Study on the Residual Gas Fraction in Cylinder by the Adjustment of Variable Valve Timing with Volumetric Efficiency, Transaction of KSAE 9 (5), pp. 82 ~ 88
6. Liu, S., Hewson, J. C., Chen J. H., Pitsch, H., 2004, Effects of strain rate on high-pressure non-premixed n-heptane autoignition in counterflow, Combustion and Flame, Vol. 137, pp. 320-339