

## GT-Power기반 디젤 배기밸브 제어모델 개발 및 연소 특성 해석

이유민\* · 조인수\*\* · 김주현\* · 이진욱†

### Analysis of Combustion Characteristics and Diesel Exhaust Valve's Control with GT-Power 1-D Detail Model

Y. M. Lee, I. S. Jo, J. H. Kim and J. W. Lee

#### Abstract

In this study, the effects of variation in cam phasing and valve lift of exhaust valves by using Cam-in-Cam system on combustion and emission characteristics for diesel engine were investigated under GT-POWER simulation environment. This paper showed analytic result of combustion characteristics and diesel exhaust valve's control with GT-Power 1-D detail model. As a result, it was found that volumetric efficiency and IMEP were decreased as the exhaust valve opening and closing timing is advanced due to its internal EGR effects. Also, it was found that NO<sub>x</sub> emission were decreased as EVC timing was retarded. These show that the retarding the exhaust valve closing and opening while keeping the duration at constant can be effective for controlling AFR and mixing rate in diffusion combustion of diesel engine.

#### 약어설명

IMEP : Indicated Mean Effective Pressure  
CIC : Cam-In-Cam  
EGR : Exhaust Gas Recirculation  
EEVC : Early Exhaust Valve Closing

#### 1. 서 론

##### 1.1 연구 배경

이산화탄소를 포함한 유해 배출가스 규제 강화와 화석연료의 고갈에 따라, 최근에는 열효율을 향상시킨 다양한 엔진들이 개발되고 있다<sup>(1,2)</sup>.

디젤 엔진의 경우 가솔린 엔진에 비해 연비와 엔진 열효율이 높지만, 질소산화물(NO<sub>x</sub>)과 미연탄화수소(UHC)가 과다하게 배출되는 문제를 지니고 있다. 이러한 문제를 보완하기 위해, 다양한 후처리 장치들과 엔진 기술이 개발되고 있다. 먼저, 간단한 후처리 방법으로는 배기계통에 산화 촉매장치를 설치하여 주로 배기중의 미립자를 제거할 목적으로 이용되고 있으며, 전처리 방법으로는 NO<sub>x</sub>를 저감시키기 위하여 배기재순환(EGR), 연료분사시기 지연, 연소실 형상 개조 등 여러 가지 방법이 연구<sup>(3,4)</sup>되고 있으나, 현재 EGR방법이 가장 효과적인 방법으로 판단되어 주로 이용되고 있다<sup>(5)</sup>.

EGR방법은 크게 내부 EGR과 외부 EGR 두 가지로 나뉜다<sup>(6)</sup>. 내부 EGR 시스템은 배기밸브 닫힘 시기를 전각시켜 실린더 안에 배기가스를 축적하고 이를 통해 흡기행정 중 들어오는 신기를 줄여주는 시스템을 말한다. 반면에 외부 EGR 시스템은 별도의 EGR 밸브를 배기밸브 근처에 설치하여 배기가스를 흡기 다기관으로 보내는 시스템을 말한다. 이러한 EGR 기술은 주로 저부하 영역에서 연료소비율을 줄이는 것에 효과적이는데, 특히 가변밸브기술을 이용하여 배기밸브의 캠의 위상을 가변화시킴으로써, NO<sub>x</sub>와 UHC를 저감할 수 있는 특징이

(Received: 16 Jan 2018, Received in revised form: 27 Feb 2018, Accepted: 20 Mar 2018)

\*승실대학교 공과대학 기계공학부

\*\*승실대학교 대학원 기계공학과

†교신저자, 승실대학교 공과대학 기계공학부

E-mail : immanuel@ssu.ac.kr

TEL : 02-820-0929

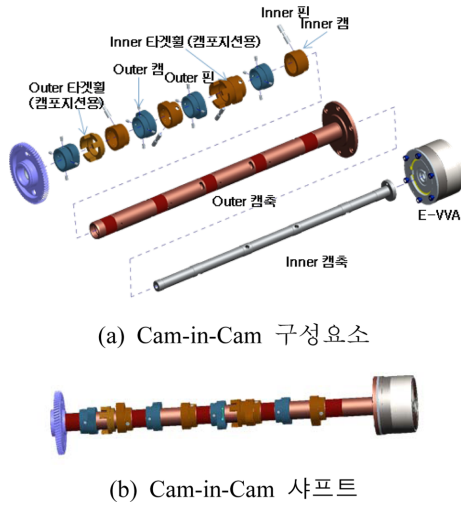


Fig. 1 디젤 가변밸브제어용 Cam-in-Cam 시스템<sup>(9)</sup>

있는 것으로 알려져 있다<sup>(7)</sup>.

자동차용 엔진에 있어서 밸브트레인 가변화 기술은 흡기밸브와 배기밸브의 개폐시기 및 밸브양정 그리고 밸브 듀레이션을 조절이 가능한 Cam-In-Cam방식<sup>(8)</sup>에 의한 현재 실용적 연구가 많이 진행되고 있다. 이의 가장 간단한 예를 들면, 흡기밸브 닫힘 시기를 진각 시키거나 지각시켰을 때, 압축 행정과 팽창 행정의 비를 변화시킨 저압축-고팽창의 밀러사이클 구현이다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 밸브트레인 가변화 방법 중 하나인 Cam-in-Cam기술을 디젤엔진 시스템에 적용하여 상대적으로 폭 넓은 배기밸브의 개폐시기 및 밸브 양정에 따른 유동 및 연소 특성 그리고 배기 성능을 수치해석 함으로써 Cam-in-Cam시스템이 디젤 엔진 성능에 미치는 영향을 알아보았다.

1.2 연구 목적 및 방법

본 연구에서는 Cam-in-Cam(CIC) 적용 디젤 엔진 시스템을 통해 흡기밸브는 고정시키고 배기밸브 개폐시기 및 밸브양정 제어를 통한 실린더내부 유동 및 연소특성을 분석하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 크게 다음과 같이 3개 연구방법을 적용하였다.

(1) CIC적용 Cam 모델 해석

Flow port와 Swirl port로 나누어지는 2개의 흡기포트 제어용 흡기 Cam 모델과는 달리, 2개 배기포트 형상은 동일하기에 본 연구에서는 대칭형 2개 배기밸브 구동을 위한 배기 Cam 모델을 완성하였다. 즉, 배기 Cam 모델을 제어할 수 있도록 모델링 해줌으로써 Cam-in-Cam의

특성을 가질 수 있게 되었다.

(2) 디젤 고압 인젝터 모델 해석

실제 CIC적용 가능성을 해석에 적용하기 앞서, 디젤 엔진의 핵심인 고압 인젝터 모델 최적화를 위해 Bosch-Tube법을 적용한 분사율 실측 데이터<sup>(10)</sup>를 바탕으로 3세대 보쉬 피에조 고압 인젝터를 모델링 한 후 엔진모델에 적용하여 신뢰성 높은 CIC시스템을 구비한 디젤 엔진 모델을 개발하였다.

2. 해석 모델링 및 해석조건

본 연구에서는 Cam-in-Cam시스템 적용 디젤 엔진의 배기밸브 제어특성을 해석하기 위해 Fig. 2의 절차로 연구를 수행하였다.

수치해석을 위해 사용된 GT-POWER (Gamma Technologies)은 상용 엔진 분석 프로그램으로 1D 및 3D 시뮬레이션을 위한 빠른 solver를 제공하며, 엔진 연소 계산을 위해 밸브, 실린더 및 연소 거동 (예측 또는 데이터 기반 기능)에 대한 자세한 정보를 포함하는 이점이 있다.

먼저, EGR 기구를 사용하지 않은 실제 엔진의 특성값을 입력한 후, 실린더 내부 연소압력과 열발생을 그리고 정량적인 NOx와 IMEP의 해석값을 실험치와 비교하여, CIC 적용 디젤 VVA엔진용 해석시스템을 구축하였다.

2.1 CIC 적용 디젤 VVA 해석 모델링 및 검증

Figure 3은 본 연구에서 개발한 GT-POWER 기반 디

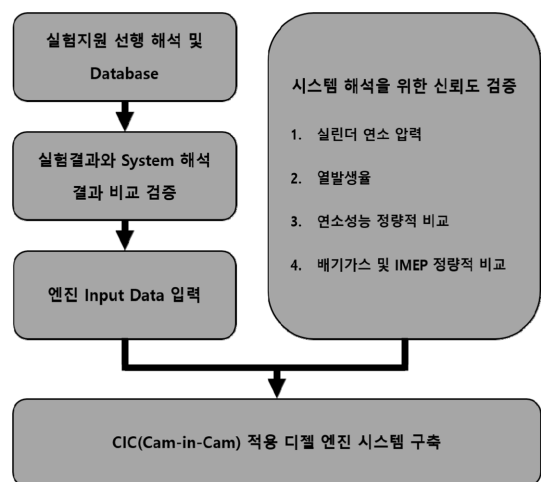


Fig. 2 Analytical process for diesel engine system using CIC

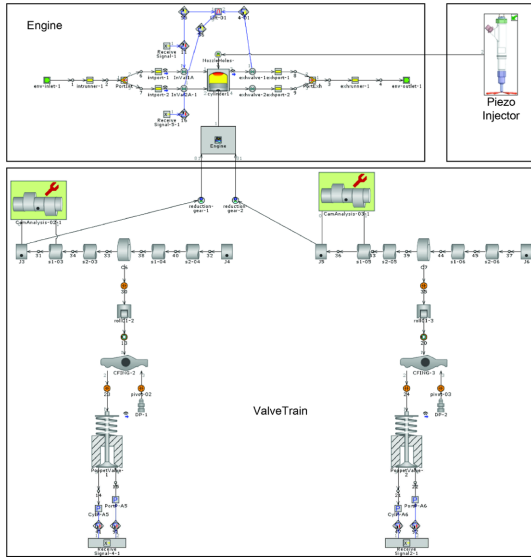


Fig. 3 Single cylinder diesel engine valve train

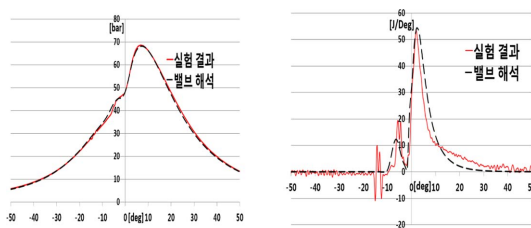


Fig. 4 Comparison of pressure and heat release rate between experiment and simulation by employing GT-Power program

젤 배기밸브 제어를 위한 밸브트레인 해석모델을 나타낸 것이다. 이를 바탕으로, 본 연구에서는 CIC를 적용한 DOHC 단기통 엔진을 GT-SUITE에서 이용하기 위해 R-엔진 Head를 기반으로 CIC 시스템용 Cam을 모델링하였다. 그리고 실제 엔진 헤드 측정을 기반으로 모델화하였고, 배기 밸브에 CIC를 적용하여 해석하였다. Fig. 4는 실제 엔진실험과 동일한 조건으로 GT-Power기반 해석모델을 시뮬레이션 하여 압력선도와 열발생을 결과를 비교한 것이다. 연소방식은 pilot injection 1회, main injection 1회로 이루어졌으며 bTDC -14.6도에서 1.39 mg의 pilot injection이, bTDC -4.254도에서 11.08 mg의 main injection이 분사되어졌다. Pilot injection에 대하여 pre-mixed combustion이 일어남을 Fig. 4 오른쪽 그림을 통하여 확인 할 수 있었고 main injection에 대하여 controlled-combustion이 일어남을 확인할 수 있었다. 일부 구간에서 엔진실험데이터의 변동을 제외하고는 대체적으로 일치

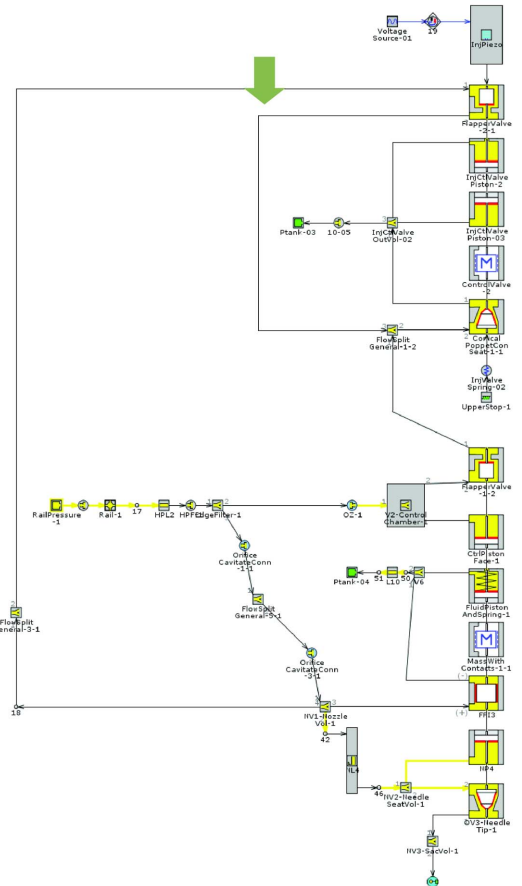


Fig. 5 Internal structure of 3th Piezo Injector model for analysis

함을 알 수 있었다. Fig. 5는 Bosch tube법을 적용하여 실제 injection rate를 측정된 결과값을 GT-Power를 이용하여 고압 인젝터 모델링을 나타낸 것이며, Fig. 6의 (a)는 실험결과와 해석 모델의 pilot injection rate을 그리고 (b)는 실험결과와 해석모델의 모델의 main injection rate을 비교한 것으로, 분사 경향성이 유사함을 알 수 있다.

## 2.2 CIC적용 디젤배기밸브 제어모델 해석조건

상기와 같이 Cam과 고압 인젝터용 해석모델을 디젤

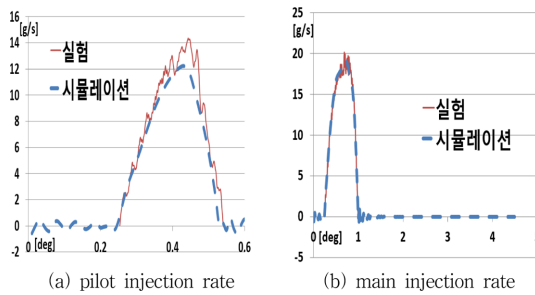


Fig. 6 Comparison of injection rate between experiment and simulation based on GT-Power program

엔진 모델에 결합하여 본 연구에 이용될 Cam-in-Cam 적용 디젤 엔진 시스템을 개발하였다. 또한 실제 엔진 데이터와의 검증을 마친 디젤 엔진 해석모델을 활용하여, 다양한 조건(밸브 타이밍, 밸브양정)으로 배기밸브를 제어해서 수치해석을 진행하였다. 이를 통해 배기밸브 개폐시기가 진각, 지각될수록, 양정이 감소할수록 변화되는 디젤 엔진의 유동 및 연소특성을 분석하였다.

이미 기술한 바와 같이, 본 해석에서는 고압 인젝터 모델을 디젤 엔진 모델에 결합하고 연료 분사압, 분사 시기, 분사 기간을 변화시켜 여러 조건에서 해석 가능하도록 구성하였다. 이를 바탕으로 최종적으로 디젤 엔진

Table 1 Specification of 3<sup>rd</sup> generation injector

Item	Unit	Bosch piezo injector
Driving mechanism	-	Servo-hydraulic
Actuator type	-	Piezo
Number of holes	EA	8
Diameter of hole	μm	134

Table 2 Specification of diesel engine

Engine specification		
Bore × Stroke	84 mm × 90 mm	
Displacement	499 cc	
Valve per cylinder	4 (2 intake and 2 exhaust)	
Compression ration	15.8	
Intake valve	I VO	bTDC 21 CAD
	I VC	aBDC 56 CAD
Exhaust valve	E VO	aTDC 72 CAD
	E VC	aTDC 8 CAD

Table 3 Conditions of EVC, EVO timing and valve lift

Case	EVO	EVC	Valve Lift	Valve Overlap
A	aTDC 62 CAD	bTDC 2 CAD	4 mm	18 CAD
			6 mm	18 CAD
			8 mm	18 CAD
B	aTDC 72 CAD	aTDC 8 CAD	4 mm	28 CAD
			6 mm	28 CAD
			8 mm	28 CAD
C	aTDC 82 CAD	aTDC 18 CAD	4 mm	38 CAD
			6 mm	38 CAD
			8 mm	38 CAD

모델을 완성할 수 있었으며, 해석모델에 적용된 R-엔진 및 인젝터 사양은 Table 1과 Table 2에 나타내었고, 엔진 해석 모델의 디젤 연소 방식은 Direct-Injection Diesel Multi-Pulse Combustion Model (DIPULSE)<sup>(10)</sup>을 적용하였다.

Table 3과 같이 CIC에서 실제 구현 가능한 9가지 배기 밸브의 개폐시기 및 밸브양정별로 엔진회전수 1200 rpm 을 적용하여 연소 및 배기성능을 해석하였다.

### 3. 해석 결과 및 고찰

Group B의 case 6은 기준이 되는 “Base” 조건으로 그에 대해 나머지 case 4, 5는 2 mm, 4 mm 씩 양정을 감소시킨 것이고, Group C는 Group B에 대하여 배기밸브 개폐시기를 10도 지각시키고 Group A는 10도 진각시킨 것이다. 각 그룹에 대한 배기밸브 양정 크기 또한 내림 차순으로 배기밸브 양정이 2 mm씩 감소한다. Fig. 7은 자연흡기 방식으로 흡입된 신기의 체적효율을 배기밸브 개폐시기 진각, 지각 및 배기밸브 양정에 변화에 따른 조건에 대해 나타낸 것이다. 배기밸브 행정 및 개폐시기 진 지각으로 인하여 체적효율이 감소하게 되는 것을 알 수 있었다.

Figure 8은 내부 EGR율을 나타낸 것으로 전반적으로 배기밸브 개폐시기 및 양정이 감소할수록 내부 EGR이 증가함을 알 수 있었다. 이러한 원인은 Fig. 9의 Mach number에서 볼 수 있듯이 Group B에서 case6이 음속에 도달하는 총 크랭크각도 구간이 64도였고 case6대비

case 5에서 13도, case4에서 case 6대비 28도만큼 증가함이다. 또한, 배기밸브 양정이 동일한 기준에서 개폐시기가 10도 진각되었을 때, case 6대비 case 3이 16도 증가하였고 개폐시기가 10도 지각되었을 때, case 6대비 case 9가 13도 감소함을 알 수 있었다. 일반적으로, 배기가스가 음속에 도달하였을 때, choked flow가 발생하여 배기가스가 배기밸브 바깥으로 빠져나가는 것을 저해시키는 것으로 알려져 있다. 이 사실을 통하여 배기밸브 개폐시 및 밸브 양정이 감소할수록 배기행정동안 배기밸브에서 가스가 갖게되는 속도가 sonic velocity에 도달하는 구간이 증가하게 되는 것을 알 수 있었다.

이는 choked flow를 발생시키게 되어 배기가스가 실린더 외부로 빠져나가는 것을 방해하는 시간을 증가시켜 내부 EGR을 증가시키는 것으로 판단된다. 배기밸브 개폐시기가 진각 및 양정이 감소에 따라 sonic velocity에 도달하는 구간이 길어지게 되는 원인은 Fig. 10(a)의

연소온도 선도에서 볼 수 있듯이, Internal EGR이 증가함에 따라 공연비가 감소하고, 그 결과 열용량이 줄어들어 연소시 실린더 내부에 열에너지를 흡수하는 신기의 양이 줄어들어 실린더내에 상대적으로 고온을 유지하여 입자들의 운동량이 상대적으로 Internal EGR량이 적은 case에서보다 커지기 때문인 것으로 판단된다.

Figure 11은 흡기밸브 개방시점에서 위 해석 조건에 대한 질량유량율을 나타내었다. (a)는 전체적인 흡기질

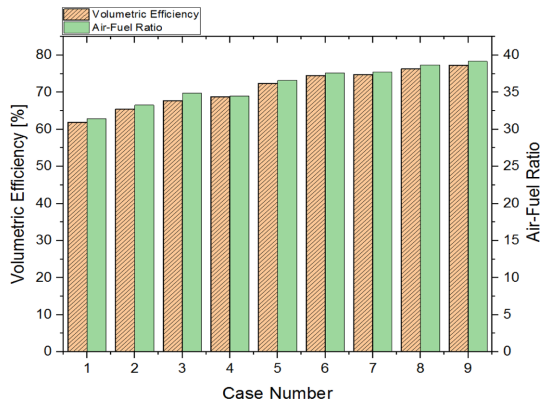


Fig. 7 Volumetric efficiency and Air-Fuel Ratio

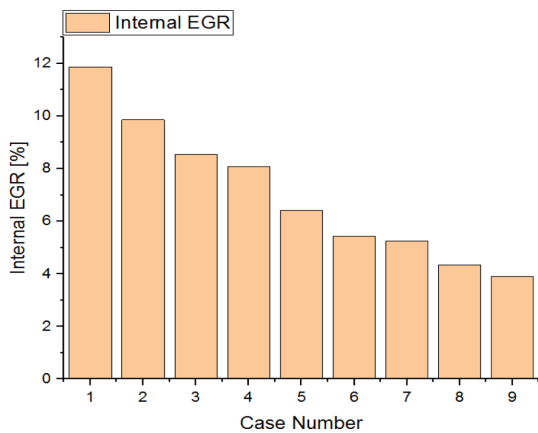


Fig. 8 Variation of internal EGR rate

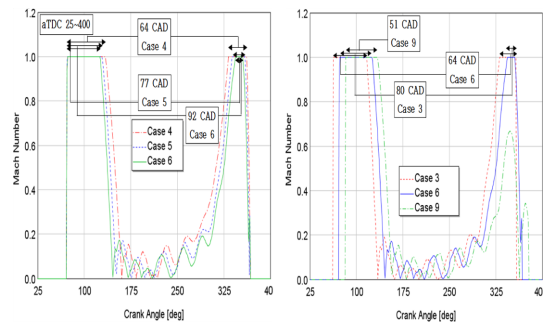
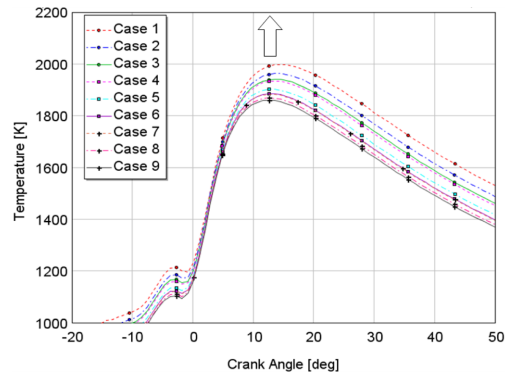
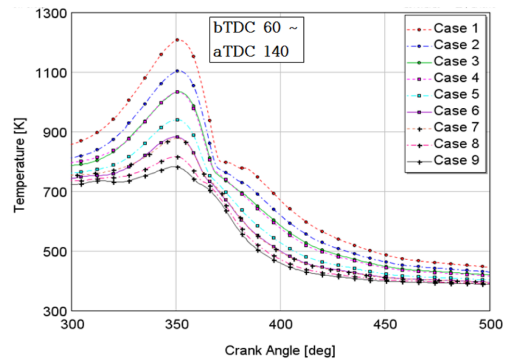


Fig. 9 Mach Number between case 4, 5, 6 and case 3, 6, 9



(a) Combustion temperature variation



(b) Temperature variation at Intake valve opening

Fig. 10 Temperature and pressure around TDC

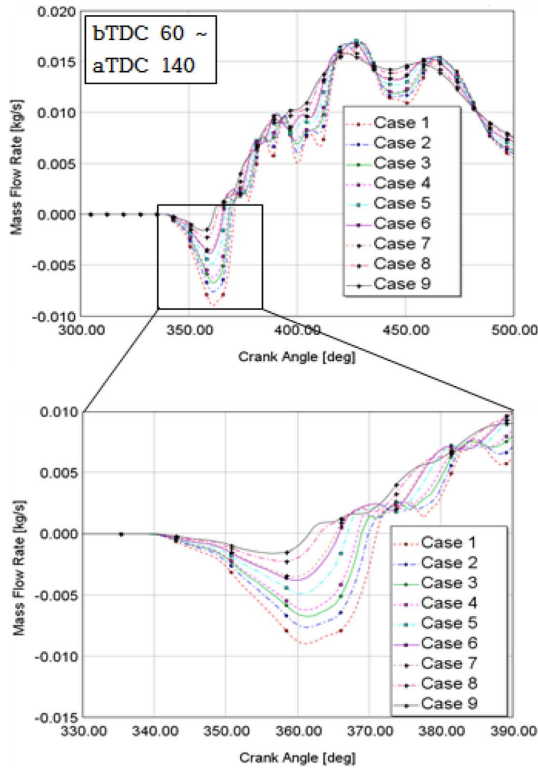


Fig. 11 Expanded diagram of mass flow rate around Intake Valve opening

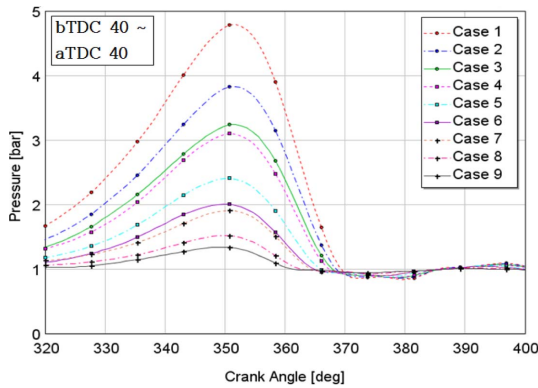


Fig. 12 pressure at intake valve opening

량 유량율이며, (b)는 내부 EGR로 인한 질량역류율을 확대한 것이다. Fig. 12는 흡기밸브가 열릴시 실린더 내 압력선도를 나타낸 것이다. 배기밸브 개폐시기의 진각 또는 양정 감소로 내부 EGR의 증가로 압력과 온도가 높아져 흡기밸브가 열리는 시점에서 실린더 내부의 연소된 가스가 흡기 포트르 역류하여 신기가 들어오는 것

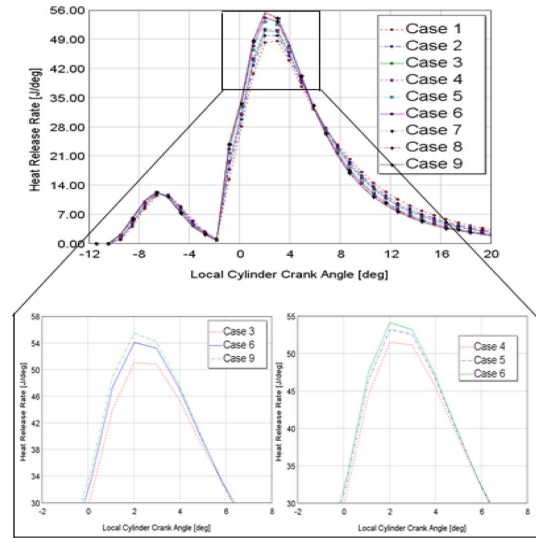


Fig. 13 Heat release rate diagram and expanded heat release rate daigram of condition case 3, 6, 9 and 4, 5, 6

을 방해하게 됨을 알 수 있었고, 그 결과 체적효율이 감소하는 것으로 판단된다.

Figure 13의 열발생을 선도에서 볼 수 있듯이, pilot injection에 대한 pre-combustion에서의 열발생을 선도는 Group A, B, C 모두 비슷한 경향을 보인다. 하지만, 배기밸브 양정이 같고 개폐시기가 변함에 따라 main combustion이 변화하는 것을 확인 할 수 있었다. 배기밸브 개폐시기가 지각될수록 main injection에 대하여 TDC근방에서 연소반응량이 증가함을 알 수 있었다. 또한, 배기밸브 개폐시기가 동일하고 밸브양정이 증가하였을 때, main injection에 대하여 연소가 aTDC 근방 2~4도에서 상대적으로 활발히 일어남을 확인 할 수 있었다. Internal EGR량은 상대적으로 배기밸브 양정이 감소되고 개폐시기가 진각된 조건에서 보다 적은 양이 실린더 내에 존재하고 모든 case에 대하여 연소효율이 약 100% 이루어진 상황을 고려하였을 때 TDC근방에서 연소반응이 불활성기체의 방해를 덜 받게되어 동시에 TDC 2~4E도 근방에서 연소가 활발히 일어나 위에서 언급한 것과 같은 열발생을 경향성을 보이는 것으로 판단된다. 한편, 지시평균유효압력(IMEP)에 영향을 주는 요소인 조기 배기밸브 열림에 따른 배기 블로다운 손실, 체적효율 그리고 실린더 내 가스혼합성분을 통해 IMEP변화를 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 15와 16은 연소가 시작되는 상사점 근방

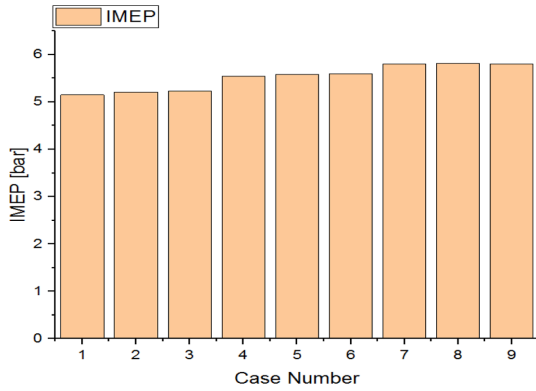


Fig. 14 comparison of Net IMEP

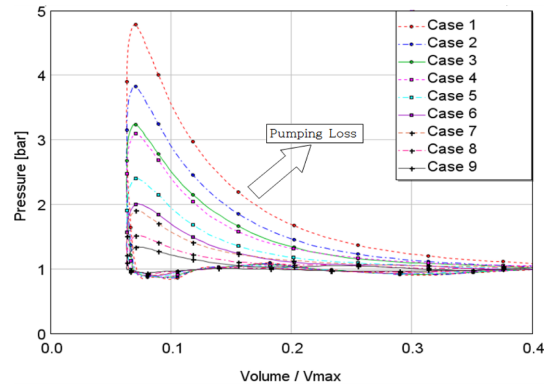


Fig. 17 Pumping Loss on P-V diagram

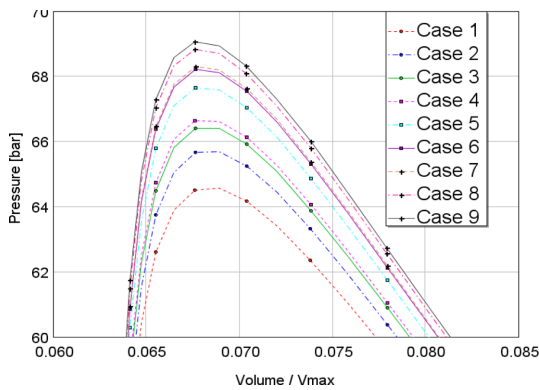


Fig. 15 High pressures region corresponding to each exhaust phasing around TDC in P-V diagram

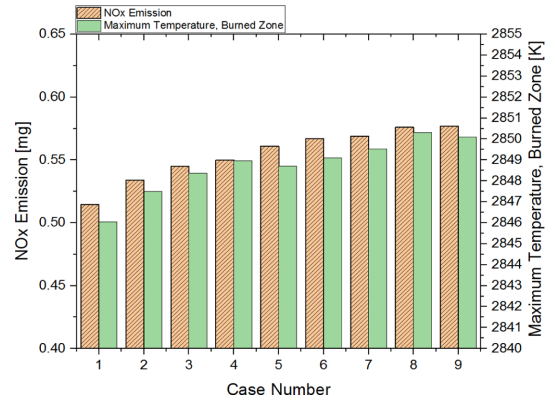


Fig. 18 NOx Emission and Maximum Temperature at Burned Zone

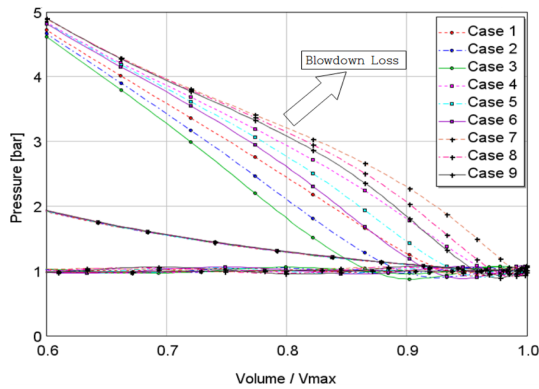


Fig. 16 Blowdown loss on P-V diagram

에서의 P-V선도를 나타낸 것이다. P-V선도에서 볼 수 있듯이, 최 하단 그래프부터 위 방향 범례 순으로 IMEP가 증가함을 알 수 있었다. 배기밸브 개폐시기가 지각 되거나 배기밸브 양정이 작은 경우, 팽창행정 중 배기 블로다운으로 인한 손실이 Fig. 16과 같이 상대

적으로 작게 측정되었다. 실린더 내 가스혼합성분 측면에서는 내부 EGR량이 증가하게 되면 pumping loss가 증가함을 알 수 있다. 배기밸브개폐시기가 진각 되거나 양정이 작아질수록 배기 시 내부 EGR에 의한 실린더 내 혼합기체 온도상승으로 인해 압력이 올라가 결국, Pumping Loss는 증가되는 것으로 판단된다. 또한, 배기밸브 개폐시기가 IMEP 결과값에 미치는 영향이 절대적이라는 것을 Fig. 17을 통해 알 수 있었다. 이미 기술한 바와 같이 본 연구에서는 Cam-in-Cam 기술을 디젤엔진 시스템에 적용하여 상대적으로 폭 넓은 배기밸브의 개폐시기 및 밸브양정에 따른 연소 특성 분석 뿐 만아니라, 이에 대한 배기성능을 분석하고자 수행한 것으로써, 이의 일환으로 NOx배출 특성을 살펴해보았다. Fig. 18은 Cam-in-Cam 적용 디젤 엔진 시스템 해석모델을 이용하여 배기밸브 개폐시기 및 배기밸브 양정에 따른 NOx성능 결과를 나타낸 것이다. NOx배출량을 비교해보니, 배기밸브 양정이 낮아지거

나 배기밸브개폐시기가 진각되었을 때 NOx가 줄어드는 경향을 보이는 것을 확인 할 수 있었다.

Case 1에 해당하는 burned zone에서의 최고온도는 2846 K이며 case 8에 해당하는 burned zone에서의 최고온도가 2850 K이기 때문에 최소온도와 최대온도차가 4 K인 것을 미루어보아, 체적효율의 증가로 인한 신기량의 증가가 NOx배기량을 증가시키는데 지대적인 영향을 미치는 것으로 판단된다. 더불어서, 배기밸브 개폐시기가 지각되거나 배기밸브 양정이 커질 때 IMEP가 증가하는 동시에 NOx도 증가하게 됨을 알 수 있었다. 이를 통해 기존 디젤엔진의 특성인 높은 열효율을 고려할 때, IMEP를 일부 저감하여 강화된 NOx배기규제를 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 GT-POWER 해석프로그램을 사용하여 Cam-in-Cam의 특성을 가지는 Cam 모델, 고압 인젝터 모델, 밸브 구동모델을 단계적으로 완성하여, 최종적으로 Cam-in-Cam 적용 디젤엔진 해석모델을 개발하였다. 이를 통해 배기밸브 양정과 개폐시기 변화에 따른 연소 및 유동 특성을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Cam 모델의 초기 입력값을 실험치를 바탕으로 설정한 후 GT-POWER를 통해 해석한 결과, 실험데이터와 매우 일치함을 알 수 있었다.

(2) 연료 분사율 측정 장치를 이용하여 본 연구에 사용한 고압 인젝터 모델을 완성하였으며, 이를 Cam-in-Cam 디젤 엔진 시스템 해석모델에 적용한 결과, 배기밸브 개폐시기가 진각 되거나 배기밸브 양정이 감소할수록 choked flow로 인한 배기가스가 실린더에 상대적으로 많이 갖히게 되고 흡기밸브가 열릴시 이른 배기밸브 닫힘으로 인한 실린더 내 고압으로 이어져 체적효율이 감소하게 된다. 이로 인한 신기의 감소로 열용량이 감소하며 실린더 내부가 고온으로 유지됨을 알 수 있었다.

(3) 전반적으로 체적효율이 IMEP 결과값에 지대적인 영향을 미치며, 또한 burned zone에서의 최고온도가 동일한 것을 미루어보아 배기밸브 개폐시기 및 양정 변화를 통한 NOx배기량에 미치는 영향이 지배적임(case1 대비 case9 해석결과 참조)을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 2017년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 산업핵심기술개발사업 지원을 받아 수행된 것이며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Akihisa, D. and Daisaku, S., "Research on Improving Thermal Efficiency through Variable Super-High Expansion Ratio Cycle", SAE Technical Paper 2010-01-0174, 2010.
- (2) Xiong, Q., Moriyoshi, Y., Morikawa, K., takahashi, Y. et al., "Improvement in Thermal Efficiency of Lean Burn Pre-Chamber Natural Gas Engine by Optimization of Combustion System", SAE Technical Paper 2017-01-0782, 2017.
- (3) Per Risberg, Gautam Kalghatgi and Hans-Erik Angstrom, "The Influence of EGR on Auto-Ignition Quality of Gasoline-like Fuels in HCCI Engines", SAE 2004-01-2952, 2004.
- (4) P. Carlucci, A. Ficarella and D. Laforgia, 2003, "Effects of Pilot Injection Parameters on Combustion for Common rail Diesel Engines", SAE Paper, 2003-01-0700, 2003.
- (5) 남정길, "체적효율을 고려한 가변밸브 개폐시기의 조정에 의한 실린더내 잔류가스량에 관한 연구", 한국자동차공학회논문집, 제9권, 제5호, pp. 82~88, 2001.
- (6) Ohmura, T., Ikemoto, M., and Iida, N., "A Study on Combustion Control by Using Internal and External EGR for HCCI Engines Fuelled with DME", SAE Technical Paper 2006-32-0045, 2006.
- (7) Salber, W., Wolters, P., Esch, T., Geiger, J. et al., "Synergies of Variable Valve Actuation and Direct Injection", SAE Technical Paper 2002-01-0706, 2002.
- (8) Sharareh Honardar, Kai Deppenkemper, Martin nijs, Stefan Pischinger, "Potentials of variable gas exchange processes in passenger car diesel engines", MTZ Scientific Articles 0912014, Vol. 75, 2009.
- (9) 영신정공(주), "전자식 복합기능 VVA 기술개발", 1차년도 보고서, 2016.
- (10) 정석철, "Cam-in-Cam 시스템 적용 디젤 엔진 성능 해석", 석사학위 논문, 2016.