

## GT-Power기반 Cam-In-Cam 가변밸브작동에 따른 스윙유동 및 연소특성 해석

이유민\* · 조인수\*\* · 김주현\* · 박승우\* · 이진욱†

### Analysis of Swirl Flow and Combustion Characteristics by Variable Valve's Operation of Cam-In-Cam System based on GT-Power Program

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

**Key Words:** Diesel Exhaust Valve(디젤 배기밸브), Cam-in-Cam(캠인캠), Variable Valvetrain(가변 밸브트레인), Valve Open/Closing Timing(밸브개폐시기), Valve Lift(밸브양정)

#### Abstract

An analytic strategy to control the variable valve actuation applied to two intake valves (flow port intake valve and swirl port intake valve) was performed in this study. we considered the variation in phasing of intake valve profiles by using the Cam-in-Cam technology. The analytic model was implemented in the GT-Power simulation program and analyzed the result of regulated emissions such as, NOx and Soot, especially with IMEP characteristics. Namely, we meticulously investigated the sources of having effect on the amount of NOx and soot formation under the test conditions with retard timing of both flow port and swirl port intake valves for decreasing the opening duration by 35CAD. Also, we analyzed the effect of in-cylinder pressure and temperature with NOx variations and in-cylinder pressure and temperature on NOx variations and normalized turbulent intensity. Through this analysis, some useful results on the combustion and flow characteristics of the swirl port and flow port control of the intake valve were obtained by this study.

#### 약어설명

IMEP : Indicated Mean Effective Pressure  
CIC : Cam-In-Cam  
FPLIVC : Flow Port Late Intake Valve Closing  
SPLIVC : Swirl Port Late Intake Valve Closing  
SIVOD : Shortened Intake Valve Opening Duration

#### 1. 서 론

최근 에너지 및 환경관점에서 저연비기술은 차량개발에 있어서 가장 중요한 목표 중 하나이며, 이는 친환경 고효율 차량의 핵심기술이다. 이와 관련된 기술 중, 밸브트레인의 가변화<sup>(1)</sup>는 연비 향상 및 배기성능 향상을 달성하기 위한 하나의 해결책이 될 수 있으며 최근에는 디젤 엔진에서의 적용성에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 압축착화 연소의 경우, 가솔린 엔진에 비해 약 30% 높은 효율을 지니고 있으나 과도한 NOx 및 soot 배출<sup>(2)</sup>의 문제를 지니고 있어, 밸브트레인의 가변화 기술로 알려진 Cam-in-Cam(CIC)기술을 활용하여 흡기 밸브 개폐시기를 가변화하여 유해 배출가스를 저감할 수 있다<sup>(3)</sup>.

세부적으로 이 기술은 스윙플랩 이용과 흡기 가변화

(Received: 27 Feb 2018, Received in revised form: 9 Apr 2018, Accepted: 6 May 2018)

\*충실대학교 기계공학과 학사과정

\*\*충실대학교 대학원 기계공학과

†교신저자, 충실대학교 기계공학과

E-mail : immanuel@ssu.ac.kr

TEL : 02-820-0929

에 따른 스월비 제어방식으로 구분할 수 있는데<sup>(4)</sup>, 본 연구에서는 CIC시스템 적용으로 실현 가능한 흡기밸브 개폐시기와 듀레이션 가변화에<sup>(5)</sup> 따른 실린더 내의 스월유동 변화 특성 및 이로 인한 연소 특성 변화를 GT-Power프로그램을 활용하여 정량적으로 분석하고자 수행하였다.

## 2. 수치 해석 모델링

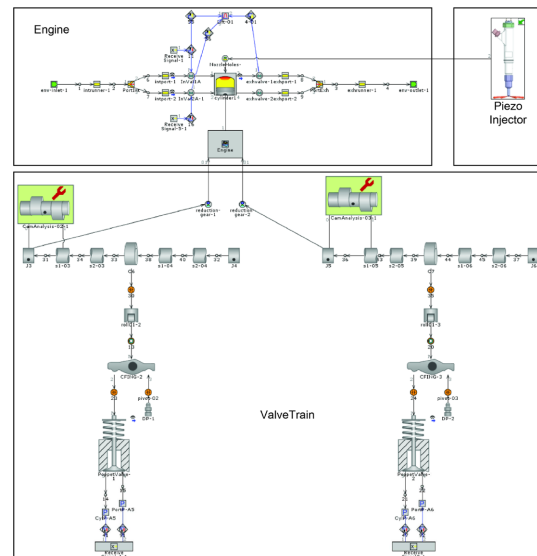
수치해석용으로 사용된 GT-POWER (Gamma Technologies)은 차량 및 파워 트레인 시뮬레이션 소프트웨어의 산업 표준으로 널리 사용되는 상용 엔진 분석 프로그램이다. 임의의 주행 조건에서의 연료 소비, 소음 등 엔진 평가 기능 및 냉각 시스템 평가로 인해 업계에서 점점 더 중요해지는 차세대 통합 CAE 어플리케이션이며, 1D 및 3D 시뮬레이션을 위한 빠른 solver를 제공하여 대규모 시스템의 현실적인 시뮬레이션을 가능하다. 또한 엔진 연소 계산을 위해 밸브, 실린더 및 연소 거동 (예측 또는 데이터 기반 기능)에 대한 자세한 정보를 포함하는 이점이 있다.

Cam in Cam 샤프트란 하나의 축에 두 개의 캠이 설치된 새로운 형식의 밸브트레인 시스템이다. 두 개의 캠 축은 동축상에 있지만, 엔진의 작동지점에 따라 흡배기 밸브를 최적의 조건으로 제어하기 위해 샤프트와 캠이 상대 회전한다.

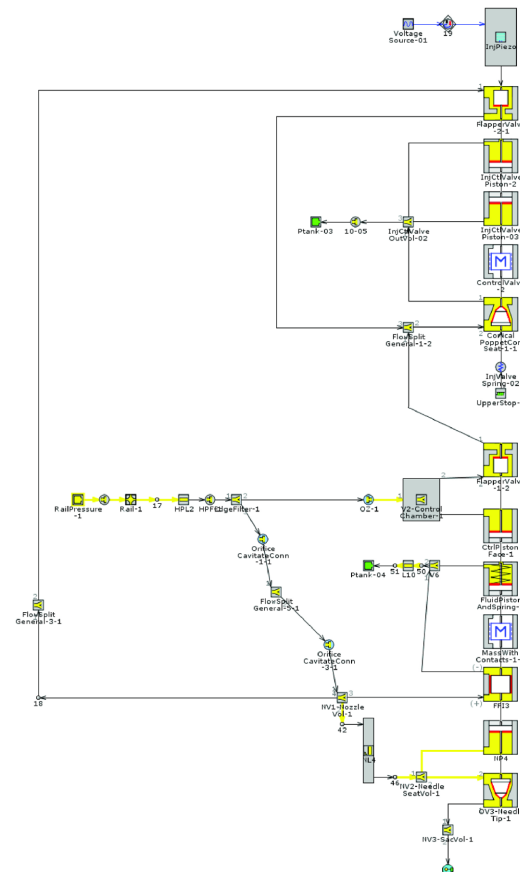
Figure 1(a)는 본 연구에서 개발한 Cam-in-Cam 구동 방식 가변밸브 시스템이 적용된 디젤 엔진 해석모델을 나타낸 것이다. 밸브트레인 cam lobe는 실제 R-엔진 head 제원을 기반으로 엔진크랭크와 연동되어 캠 샤프트가 구동되고, lobe를 통해 흡배기 밸브 프로파일 값이 생성되고, 이 값은 엔진모델 파트의 밸브 파라미터로 입력된다.

디젤 연소 모델은 NOx 해석 정확도가 향상된 Direct-Injection Diesel Multi-Pulse Combustion Model (DIPULSE)를 사용하였다<sup>(6)</sup>. Fig. 1(b)는 3세대 피에조 고압 인젝터 (보쉬)의 해석모델로 내부 동특성을 고려하여 실물을 기반으로 모델 변수를 입력하였다. 그리고 각 해석 조건에서 연료 분사량은 12.4 mg으로 일정하게 유지하였다.

Table 1은 엔진 해석모델에 입력된 기본 설정 값으로 KAIST 실험에 사용된 R엔진 제원이며, 본 연구에서는 이 실험데이터를 기본값으로 설정하여 관련 수치모델링 및 해석을 수행하였다.



(a) full-model for Cam-in-cam



(b) Injector model

Fig. 1 Simulation model for variable valve timing

Table 1 Specification of diesel engine

Engine specification		
Bore x Stroke	84 mm × 90 mm	
Displacement	499 cc	
Valve per cylinder	4 (2 intake and 2 exhaust)	
Compression ration	15.8	
Intake valve	IVO	bTDC 21 CAD
	IVC	aBDC 56 CAD
Exhaust valve	EVO	bBDC 108 CAD
	EVC	aTDC 8 CAD

## 2.1 해석 모델 검증

Figure 2는 해석모델과 실험의 연소실 압력과 열발생율 선도를 비교한 것으로, 연소압력과 열발생율의 경향에 있어서 일부 오차를 포함하지만 전반적으로 일치함을 확인하였다. 더불어서 공연비와 IMEPN, IMEPG 값 비교를 통한 추가 검증을 진행하였다.

Figure 3은 KAIST R엔진에 적용된 피에조 고압 인젝터(BOSCH)의 실제 injection rate을 해석 모델링 결과값

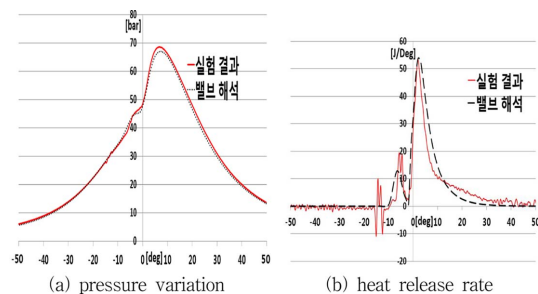


Fig. 2 Comparison of heat release rate and pressure between KAIST experiment and GT-Power simulation

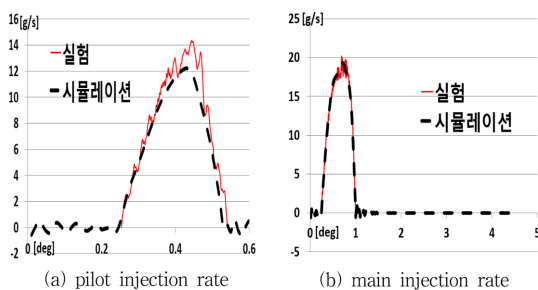


Fig. 3 Comparison of injection rate between experiment and simulation

Table 2 Conditions of FPLIVC, SPLIVC timing and variable intake valve opening duration

Group	Case	FPLIVC	SPLIVC	SIVOD
A	1	0 CAD	0 CAD	0 CAD
	2	30 CAD	30 CAD	
	3	60 CAD	60 CAD	
	4	30 CAD	0 CAD	
	5	60 CAD	0 CAD	
B	6	0 CAD	0 CAD	-35 CAD
	7	30 CAD	0 CAD	
	8	60 CAD	0 CAD	

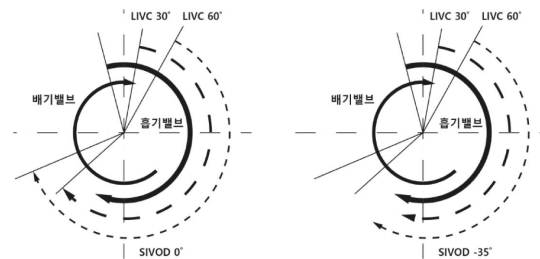


Fig. 4 General and variable open &amp; closing timing of the intake valves

과 비교한 것이다. (a)는 pilot injection rate에 대해 비교한 것이고 (b)는 main injection rate를 비교한 것으로, 매우 유사한 injection rate을 보임을 알 수 있었다.

앞서 완성된 엔진해석 모델을 이용하여 흡기밸브의 Flow port 및 Swirl Port 개폐시기를 개별적으로 제어하여 그에 따른 유동 및 연소특성을 해석하였다. 기본 흡기밸브 및 가변 밸브 타이밍을 굵은 실선으로 Fig. 4에 나타내었으며, 가변하는 swirl port 및 flow port 흡기밸브의 가변범위를 점선으로 나타내었다.

Table 2는 본 연구의 엔진 해석모델에 적용한 각각의 흡기밸브 제어 변수를 나타낸 것이다.

음영으로 표시한 Case 1 조건이 다른 결과와 비교되는 기본 조건으로 “Base” 이다. Case 2, 3는 “Base”에 대비 각 포트를 30도, 60도씩 지각하였고, Case 4, 5는 flow port 만 30도, 60도씩 지각시켰다.

$$\text{Swirl Ratio} = \frac{\text{angular speed}}{\text{engine speed}} = \frac{\omega}{N} \quad (1)$$

$$\text{Normalized Turbulent Intensity} = \frac{u'}{V_p} \quad (2)$$

$u'$  : turbulent intensity [m/s]

$V_p$  : Mean velocity of the piston [m/s]

Case 6, 7, 8은 swirl port flow port에 연결된 흡기밸브 opening duration을 35도 감소시키고 flow port에 연결된 흡기밸브만 0도, 30도, 60도 지각시킨 것이다.

스웰비의 정의는 실린더 내 선회 운동하는 가스의 각 속도를 엔진 크랭크샤프트 회전속도로 나눈 비로써 soot formation을 감축시키는데 있어서 중요한 인자이고 난류강도는 난류속도 변동을 피스톤의 평균속도를 나눈 비로써, Swirl ratio에 의해 영향을 받고 연료와 신기와 well-mixing 정도를 가늠할 수 있는 인자이다.

각 흡기밸브개폐시기 가변화에 따라 변하게 되는 swirl number와 난류강도를 계산하는 GT-POWER 내부의 공식을 아래 식 (1)과 식 (2)에 나타내었다.

위 두 인자를 중점적으로 열 발생을 위상, 연소 성능 및 배기성능 해석을 진행하였고 그 중 디젤엔진에서 배출되는 배기가스 중 관심이 높은 Soot Formation 과 NOx를 동시에 줄일 수 있는 방법을 구해보았다.

### 3. 해석 결과 및 고찰

Figure 5는 group A에 해당하는 밸브구동 조건에서의 스웰비 변화를 나타낸 것이다. Case 2, 3에서는 flow port, swirl port흡기 밸브를 지각시킬수록, Case 4, 5에서는 flow port흡기 밸브 개폐시기가 지각될수록 스웰비가 증가되었음을 알 수 있었다. Case 2, 3에서는 swirl port, flow port에서의 개폐시기가 동일한 각도로 지각될수록, 실린더 내 압력과 흡기 port에서의 압력차가 커져 Fig. 6의 흡입 질량흐름율과 같이 흡기

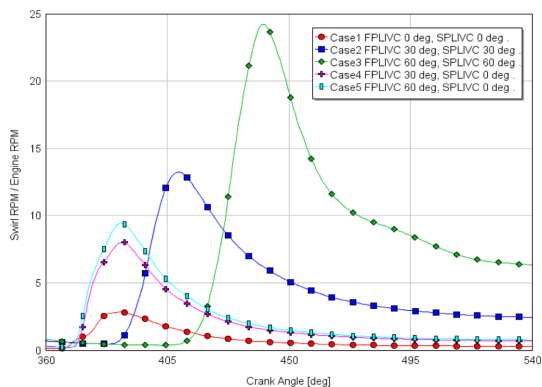
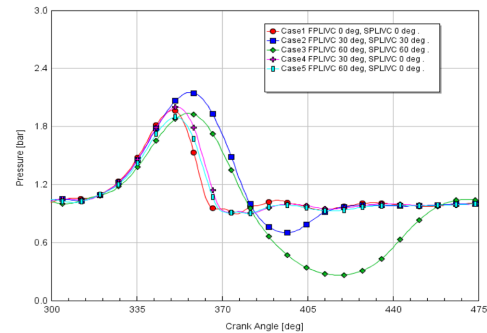
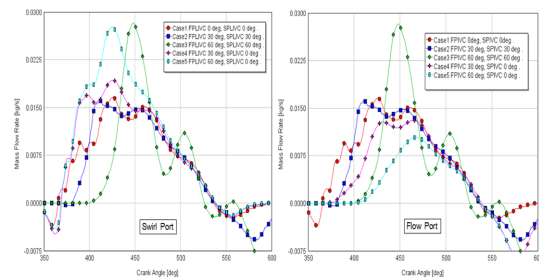


Fig. 5 Swirl ratio variation (group A)



(a) In-cylinder pressure around intake stroke



(b) Intake mass flow rate at the swirl port and flow port around intake stroke

Fig. 6 Pressure variation and mass flow rate around intake stroke

밸브로 들어오는 흡기유량의 최고점이 증가하게 됨을 알 수 있었다. 이로 인해 선회하며 들어오는 신기의 운동량은 swirl port에 연결된 흡기밸브가 지각되지 않은 상태에서 선회하여 들어오는 신기보다 운동량이 증가하며, 하사점 이후로 선회하고 있는 신기에게 운동량을 지속적으로 부여해 주기 때문에 스웰비가 증가하는 것으로 판단된다.

반면, Case 4, 5에서는 flow port 흡기밸브 개폐시기가 지각될수록 swirl port에서 회전하여 들어오는 신기에 충돌영향을 미치지 않아 스웰비가 흡기행정에서 증가하는 것으로 판단된다. 또한, 선회하는 신기의 운동량이 flow port 개폐시기 지각만으로 스웰비 증가에 미치는 영향보다 큼을 알 수 있었다.

Figure 7~9는 점화지연과 연소기간, 열발생율선도, 실린더내 온도변화를 각각 나타낸 것이다. 여기서 점화지연은 연소시작 시점과 인젝터에서 주입된 연료가 0.1% 탔을 때 사이의 기간 그리고 combustion duration은 연료가 90%까지 burned 되었을 때의 기간을 나타낸다. group A에서 flow port 또는 swirl port 개폐시기가 지각됨에 따라, 체적효율이 감소하며 압축행정 시 동일한 크랭크 각도에 대하여 실린더 내 압력이 줄어들어 점화지연이

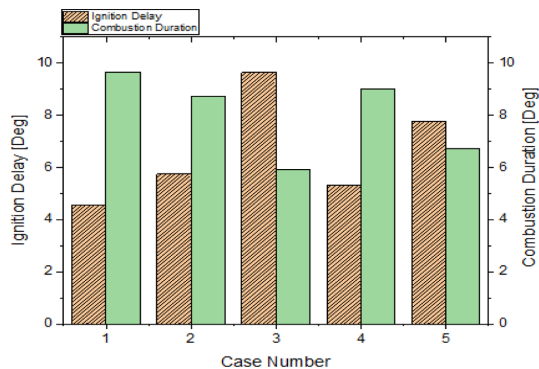


Fig. 7 Ignition delay and combustion duration under the condition of group A

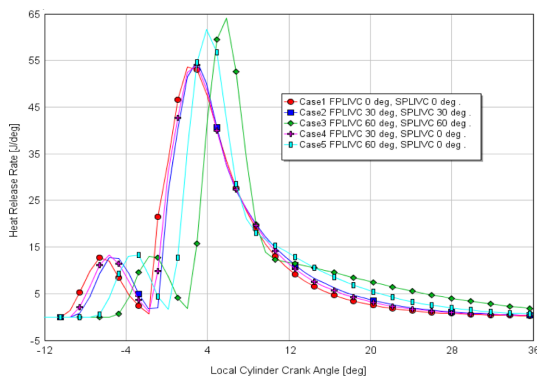


Fig. 8 Heat release rate around TDC

이루어지게 됨을 Fig. 7을 통해 알 수 있었다. Fig. 8의 열발생을 선도에서 보듯이, Case 3, 5에서의 열발생율이 순차적으로 상사점 이후 크랭크 각도 4, 6도에서 61.6 J/deg, 64 J/deg로 급격히 증가함을 알 수 있었다. 이는 Fig. 10에서 확인 할 수 있듯이 Case 3, 5에서 Case 1, 2, 4와 비교하였을 때, 체적효율의 감소로 인하여 점화 지연이 길어져 연료와 신기가 균질하게 섞여질 시간이 상대적으로 커져 main combustion영역에서 열발생율이 높아지는 것으로 판단된다. 그뿐만 아니라, Case 3, 5에서 상사점 근방에서 눈에 띄는 열발생을 증가로 인하여 실린더 내부 온도가 Case 1, 2, 4와 비교했을 때 상대적으로 높아지는 것을 Fig. 9의 온도선도를 통하여 확인할 수 있었다. 또한 이러한 Case 3, 5에서 상대적으로 다른 Case경우보다 실린더 내부가 고온상태이면 연료와 산소의 화학반응 속도를 높여 combustion duration이 짧아지는 것으로 이어짐을 Fig. 7을 통해 확인할 수 있었다. 특히, 압축말기에서 Case 3의 스웰비가 Case 1, 2, 4, 5보다 급격히 커지기 때문에 상사점 근방에서 신기와 연료

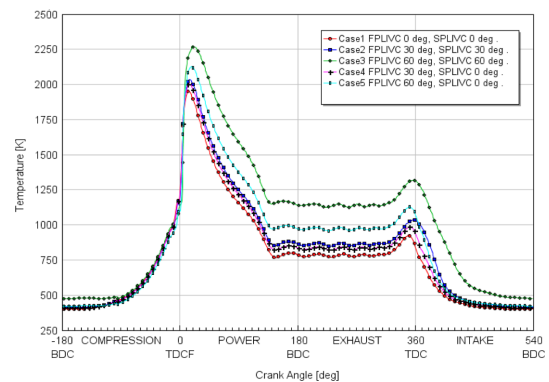


Fig. 9 In-cylinder temperature variation

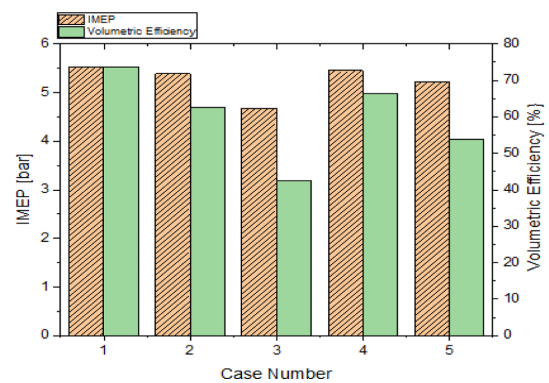


Fig. 10 Net IMEP and volumetric efficiency corresponding to group A

간의 혼합이 잘 이루어질 것을 판단된다. 이에 더불어 점화지연으로 인한 연료와 신기간의 균질도가 높아 Fig. 5에 나타난 압축말기 및 연소 시 난류강도가 높아짐을 통해 상사점 이후 연료와 산소의 혼합을 도와 열발생율이 증가함을 알 수 있었다.

Figure 10은 IMEP와 체적효율의 변화를 나타낸 것이다. 체적효율이 증가할수록 IMEP가 증가하는 것을 알 수 있으며, 또한 피스톤이 엔진 실린더 내부의 최하단에 위치할 때의 체적을 최상단에 위치할 때의 체적으로 나누고 그 값에 체적효율을 곱한 값을 유효압축비라고 하는데, 유효압축비가 감소할수록 IMEP가 감소함을 알 수 있었다.

그리고 본 연구에서는 Cam-in-Cam기술을 디젤엔진 시스템에 적용하여 상대적으로 폭 넓은 흡기밸브의 개폐시기 조절에 따른 연소 특성 분석 뿐 만아니라, 이에 대한 배기성능을 분석하고자 수행한 것으로써, 이의 일환으로 NOx와 soot 배출 특성을 살펴보았다.



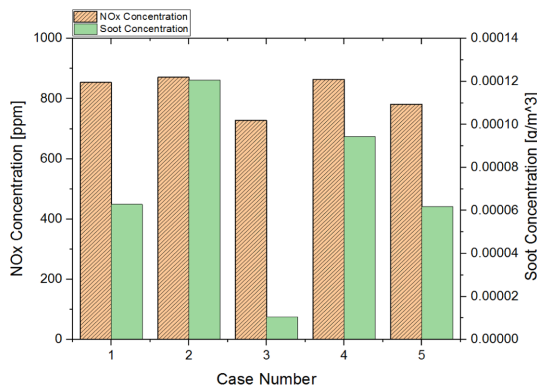


Fig. 11 Comparison of NOx concentration and soot formation in the group B

우선 Fig. 11을 통해 NOx와 sootdp 대한 해석결과값을 확인한 결과, 두 배출물이 동시에 저감된 조건은 Case 3뿐이었다. 먼저 soot가 저감된 이유는 다음의 두 가지 영향으로 생각할 수 있다. 첫 번째는, 연료분사 시 실린더 내 산소와 적절한 혼합으로 인해 국부적으로 연료가 농후하게 되는 것을 방지하여 soot formation 감소이다. 위 연구에서는 산소와 연료의 균질한 혼합을 유도하는 방법이 피에조 인젝터에서 600 bar로 분사되는 고압분사와 산소의 적절한 혼합을 위해 높은 산소 concentration, 높은 스월비에 의한 연료와 산소의 혼합과 체적 효율 감소 때문에 연소 지연으로 인한 산소와 연료의 균질도 상승으로 인해 발생한 난류강도증가를 생각할 수 있다.

두 번째로, 연소실 내의 팽창, 배기 행정에서의 고온으로 인한 soot 산화반응을 통해 연소과정 중 생성된 soot를 감축시킬 수 있다. 이미 기술한바와 같이 Case 3에서 팽창, 배기 행정에서 실린더 내 체적효율 감소로 열용량이 낮아져 다른 Case보다 상대적으로 큰 온도증가와 flow port, swirl port 흡기밸브개폐시기 지각으로 인한 스월비 향상으로 인해 연소가 Case 1 대비 4.9도 지각될 동안 연료와 공기의 혼합이 잘 이루어지게 되며, 연료와 산소가 균질해짐에 따라 연소시 난류강도 증가로 결국, soot concentration이 Case 1 대비 83% 저감되는 것을 알 수 있었다. group A중 두 번째로 스월비가 높으면서 체적효율이 Case 3 대비 20% 높음에도 불구하고 Case 1 대비 soot formation 이 47.5% 증가함을 알 수 있다. 이러한 이유는 압축말기에서 Case 3보다 상대적으로 낮은 swirl 비와 Fig. 10을 통해 확인할 수 있듯이 상사점 근처에서 Case 1과 비슷한 난류강도 값을 이

루고 있어 Case 2보다 국부적으로 연료가 농후한 지역을 감소시키기는 어려웠을 것이라 판단된다. 또한, 체적 효율의 증가로 실린더 내 온도 감소로 인해 soot 산화반응을 통한 soot 저감이 이루어지지 않았다. 이러한 사실을 통하여 위 실험 조건에서 상사점 근방에 난류강도를 증가시켜 soot 형성을 감소시키는 것이 실린더 내 산소량의 증가로 soot 형성을 저감시키는 것보다 더 효과적이라는 것도 알 수 있었다. 또한, Case 5에서는 Case 2대비 체적효율이 8.8% 감소함에도 불구하고 Case 1과 비슷하게 soot를 배출하는 것을 확인할 수 있다. 이는 Case 2대비 스월비가 낮음에도 팽창행정에서 Case 2보다 실린더 내 높은 고온으로 유지되며 점화지연으로 인하여 산소와 연료의 혼합할 시간이 Case 2보다 길어져 결국 연소 시 난류강도 증가로 인하여 soot formation이 저감되었을 것으로 판단된다.

Figure 9에 나타난 온도그래프를 통해 확인 할 수 있듯이, 모든 흡기밸브 개폐시기에 대한 경우에 combustion efficiency가 거의 100%이기 때문에 신기가 감소할수록 열용량이 작아져 온도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. Case 2,4의 경우 NOx 생성에서 흡기밸브 개폐시기에 지각에 따라 압축행정 시 역류로 인해 신기가 감소하였지만, 연소시 실린더 내 Case1보다 상대적으로 높은 평균온도로 인하여 Case 1에서 보다 더 NOx 양이 증가하게 되었다. 그러나 Case 3, 5인 경우 실린더 내 전체적인 온도증가로 인해 NOx 생성에 미치는 영향보다 개폐시기 지각으로 인한 신기역류로 유입되는 신기 감소가 NOx생성 방지에 미치는 영향이 더 크기 때문에 NOx 배출량이 감소하는 것으로 판단된다.

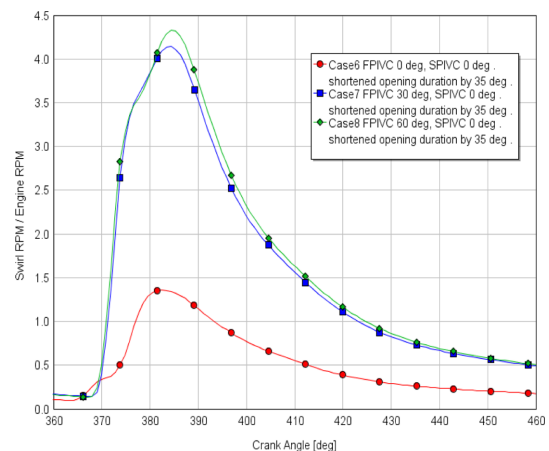


Fig. 12 Swirl ratio variation (group B)

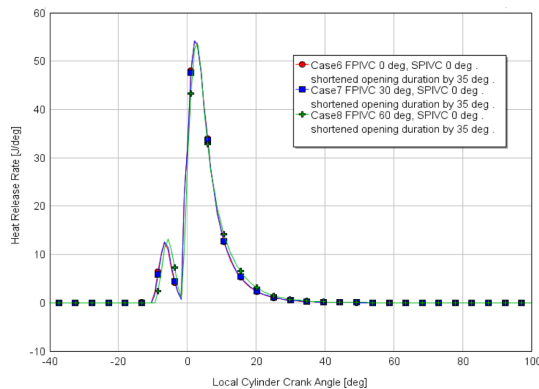


Fig. 13 Heat release rate around TDC

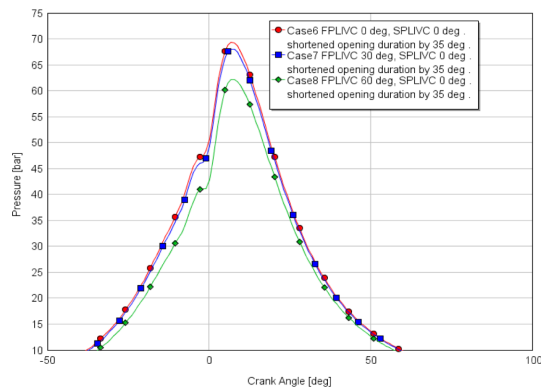


Fig. 14 Pressure variations of group B around TDC

Figure 12는 group B 밸브 작동 조건시, 스웰비 변화를 나타낸 것이다. 위 실험 조건 또한 Case 4, 5와 같이 swirl port의 helical 형상으로 인해 선회 운동하여 들어오는 신기가 flow port 흡기 밸브에서 실린더 축 방향으로 들어오는 신기에 의해 선회운동이 방해받기 때문에 스웰비가 감소하는 것으로 판단된다.

Figure 13은 group B 밸브 작동 조건에서의 열발생율의 변화를 나타낸 것인데, 전체적으로 유사한 열발생율을 보임을 알 수 있었다.

Figure 14의 group B 조건에 해당하는 실린더 내부 압력선도에서 알 수 있듯이, Case 6, 7에서 압축말기 근방에서 group A의 실린더 내 최고압력인 66.7 bar 보다 2~3 bar 증가함을 알 수 있었다. 실린더 내 연소시 압력 증가의 원인은 실린더 내 개폐시기 duration 감축에 따른 신기역류 감소로 판단된다.

Figure 15는 group B 밸브 작동조건시, 체적효율과 IMEP를 비교해서 나타낸 것이다. group A의 IMEP와 비교한 결과, 흡기 밸브개폐시기 duration 축소로 인해

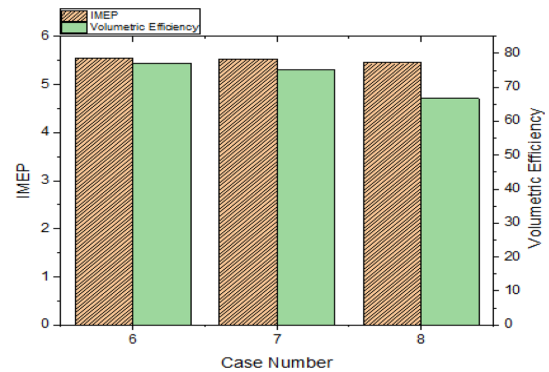


Fig. 15 IMEP and volumetric efficiency (group B)

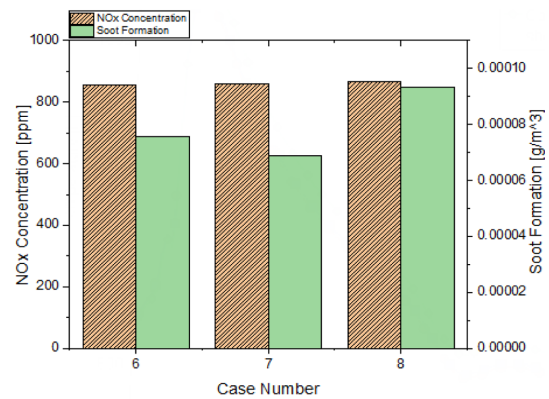


Fig. 16 Soot and NOx concentration (group B)

압축행정시, 신기가 역류로 빠져나가는 양이 줄어들어 IMEP 및 체적효율의 증가로 이어지게 되었다. 또한 flow port 개폐시기가 지각된 순으로 유효압축비가 감소하여 IMEP가 감소함을 알 수 있었다.

Figure 16은 group B 밸브 작동조건에서 soot와 NOx 배출량을 나타낸 것이다. Case 6, 7에서 Case 8 조건에서보다 soot formation이 상대적으로 감소된 것을 알 수 있었다. 이에 대한 이유는 Case 6, 7에서 실린더 내 압력증가로 인하여 신기의 입자들과 연료와의 균질한 혼합으로 이어지며 상대적으로 최고압력이 낮은 Case 8 조건에서보다 soot formation이 감소된 것으로 판단된다. 반면, NOx 배기량은 group B의 3가지 Case 모두 비슷한 배기량을 보임을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 GT-POWER 해석프로그램을 사용하여

Cam-in-Cam 메커니즘의 Valvetrain model, 피에조 방식 고압 인젝터 모델, 단기통 엔진 모델을 완성하여, 최종적으로 Cam-in-Cam 적용 디젤엔진 해석모델(full circuit model)을 개발하였다.

이를 통해 흡기밸브의 Swirl port, Flow port 개폐 시기 제어에 따른 연소 및 유동 특성을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 실제 실험 결과를 바탕으로 하는 기본("Base") 해석 모델의 결과 대비 흡기밸브의 flow port, swirl port 개폐시기 위상을 같은 각도로 지각시켰을 때가 flow port 흡기밸브만 지각시켰을 때 보다 스월비 증가에 더 크게 영향을 미침을 알 수 있었다.

(2) 흡기밸브 개폐시기 가변에 따른 체적효율 변화를 분석한 결과, 체적효율 인자가 점화지연에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

(3) 모든 Case에 결과 중, IMEP는 유효 압축비에 따라 변하게 되며, 유효압축비가 가장 낮은 Case 3에서 4.67 bar로 Case 1 대비 약 15% 감소하였다. 흡기밸브 개폐시간이 감소하는 Case 5 조건에서는 흡기포트로 역류하는 양이 감소하였고 Case 1 대비 5.55 bar로 Case 1 대비 0.6% 증가함을 알 수 있었다.

(4) 스월비가 높은 Case 3에서 유효압축비가 감소함에 따라 점화지연이 이루어져 연료와 신기간의 혼합이 이루어질 시간이 길어져 균질도가 높아지게 되며, 이로 인해 main combustion에서 난류강도가 증가하게 되고 soot formation이 Case 1 대비 83% 저감되는 동시에 NOx 또한 Case 1 대비 15% 감소함을 알 수 있었다.

(5) 흡기밸브 개폐시간을 단축시켰을 때, 체적효율의 증가로 최고압력이 높아지며, 이로 인해 연료분사시, 신기와 연료간의 균질도 향상을 유도하여 soot formation을 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- (1) K. Hwang, I. Hwang, H. Lee, H. Park, et al., "Development of New High-Efficiency Kappa 1.6L GDI Engine", SAE Technical Paper 2016-01-0667, 2016.
- (2) F. Ibrahim, W. Wan Mahmood, S. Abdullah and M. Mansor, "Comparison of Simple and Detailed Soot Models in the Study of Soot Formation in a Compression Ignition Diesel Engine", SAE Technical Paper 2017-01-1006, 2017.
- (3) S. Itabashi, K. Niimi, S. Kamoshita, A. Shoji, et al., "Study of Improvements in NOx Reduction Performance on Simultaneous Reduction System of PM and NOx", SAE Technical Paper 2005-01-3884, 2005.
- (4) F. Leach, M. Davy, A. Weall and B. Cooper, "Comparing the Effect of a Swirl Flap and Asymmetric Inlet Valve Opening on a Light Duty Diesel Engine", SAE Technical Paper 2017-01-2429, 2017.
- (5) Sharareh Honardar, Kai Deppenkemper, Martin nijs and Stefan Pischinger, "Potentials of variable gas exchange processes in passenger car diesel engines," MTZ Scientific Articles 0912014, Vol. 75, 2009.
- (6) Y. Yu, W. Su and H. Huang, "Study of Fuel Distribution on Diesel PCCI Combustion by Development of a New Characteristic-Time Combustion Model", SAE Int. J. Fuels Lubr., Vol. 1, No. 1, 957-969, 2009.