

# 캠리스엔진의 가변 밸브 타이밍에 따른 성능특성에 관한 연구

김 성 수<sup>\*1)</sup> · 최 세 범<sup>1)</sup>

한국과학기술원 기계공학과<sup>1)</sup>

## A Study on the Performance Characteristics in Camless Engine According to Variable Valve Timing

Seongsoo Kim<sup>\*1)</sup> · Sebum Choi<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, KAIST, 373-1 Gusong-dong, Yusong-gu, Daejeon 305-701, Korea

**Abstract** : Variable intake and exhaust valve timing control in an Internal Combustion engine affects the fuel efficiency, power output, and emission. The typical examples are VVT system. However, the VVT system has a limitation for fully control the variable intake and exhaust valve timing. Recently, A Camless Engine which can control the intake and exhaust valve with a hydraulic actuator excluding camshaft, and enables fully variable valve control has been studied. Because the Camless Engine can fully control the intake and exhaust valve timing, valve duration, valve lift, and valve deactivation, it overcomes the limitations of the existing VVT engine, and improves extremely engine performance and emission characteristics. In this study, Camless system was applied to motorcycle engine using numerical analysis program "Ricardo WAVE" and it was analyzed the Idle stability, engine performance, and emission according to variable intake valve close timing on Idle condition.

**Key words** : Camless Engine(캠리스 엔진), Hydraulic Actuator(유압식 액츄에이터), VVT(Variable Valve Timing: 가변밸브 타이밍), Variable Compression Ratio(가변 압축비), ISFC(Indicated Specific Fuel Consumption: 순수 연료 소비량)

### Nomenclature

IVO : Intake Valve Open  
 IVC : Intake Valve Close  
 EVO : Exhaust Valve Open  
 EVC : Exhaust Valve Close  
 DOHC : Double Overhead Camshaft  
 TDC : Top Dead Center  
 BDC : Bottom Dead Center  
 CA : Crank Angle

### 1. 서론

내연기관의 엔진에서 흡기 밸브 및 배기 밸브의 동작시점의 변화는 연비, 배기가스, 및 출력에 상당한 영향을 끼친다.<sup>1)</sup> 기존의 밸브 타이밍을 가변 시킬 수 있는 엔진(VVT: Variable Valve Timing Engine)은 액츄에이터를 통하여 캠축에 약간의 변화를 주어 엔진 밸브의 동작시점을 조절하게 되어 있으나 그 변화의 폭이 매우 제한돼 있다. 이에 반해 캠을 제거하고 유압

\* 김성수, E-mail: kimseng77@kaist.ac.kr

식 액츄에이터나 전자석식 액츄에이터를 사용하여 엔진 밸브를 직접 구동시킬 수 있는 캠리스 엔진(Camless Engine)은 흡·배기 밸브의 동작시점, 열림 기간(Valve Duration), 양정(Valve Lift) 및 밸브 디액티베이션 (valve Deactivation) 등을 자유자재로 조절 가능하기 때문에 기존의 내연기관이 가지고 있는 엔진 성능의 한계를 뛰어 넘었다.<sup>2)3)4)</sup>

차량의 고속주행 시에는 엔진 밸브의 타이밍을 제어하여 흡기 밸브와 배기 밸브 사이의 오버랩을 변화시켜 높은 출력을 얻을 수 있고, 차량의 정속 주행 시에는 높은 출력을 필요로 하지 않기 때문에 다시 엔진 밸브의 타이밍을 변화시켜 출력 및 연료 소비율을 낮출 수 있다. 또한 캠리스 엔진의 다양한 장점 중 하나인 밸브의 디액티베이션을 통해서도 연료 소비율을 절감시킬 수 있는데, 높은 출력을 필요로 하지 않는 차량의 공회전 상태나 정속 주행시에 모든 실린더들이 작동될 필요가 없기 때문에 실린더 일부를 작동시키지 않으므로서 배기량을 줄여 연료 소비율 및 배기가스를 줄인다.<sup>5)6)</sup>

캠리스 엔진은 운전 조건에 따라 최적화된 흡배기 밸브의 움직임을 구현하여 기존의 VVT엔진에 비해 연료 소비율 및 출력을 혁신적으로 개선할 수 있고, 또한 실린더 내의 잔류 가스량을 제어하여 질소 산화물 및 탄화수소와 같은 유해 배기가스의 배출량 역시 줄일 수 있기 때문에 미래의 신개념 엔진으로 Lotus, Ford, Valeo, BMW, FEV 등에서 활발히 연구 되고 있다.

본 연구에서는 Ricardo사의 엔진해석 프로그램 WAVE를 사용하여 prototype 캠리스 엔진을 모델링 했고, 상대적으로 큰 출력을 필요로 하지 않는 공회전 상태에서 캠리스 엔진의 흡기 밸브의 닫히는 시기를 변화시켜 압축비를 가변시켰다. 또한 그에 따른 공회전 안정성과 엔진 성능 및 배기가스의 배출 특성에 미치는 영향에 대해 비교 분석해보았다.

## 2. 시뮬레이션 장치 및 해석조건

### 2.1 시뮬레이션 장치

본 연구에 사용한 캠리스 엔진은 단기통 DOHC

가솔린 엔진으로 시뮬레이션 모델 및 엔진 제원은 Fig.1와 Table 1에 나타낸 것과 같다. 또한 이 모델링은 매니폴드를 포함하여 스로틀과 에어클리너 등을 포함한 흡기계 시스템과 엔진 실린더 사이의 밀접한 상호관계를 고려한 것이다.

### 2.2 시뮬레이션 해석조건

실험 조건은 상대적으로 큰 출력을 필요로 하지 않는 공회전 상태에 흡기 밸브의 닫히는 시기를 조절하여 압축비를 변화시켰고, 그에 따른 연비, 엔진 운전 특성 변화 및 배기 가스의 배출물 특성을 파악하였다.

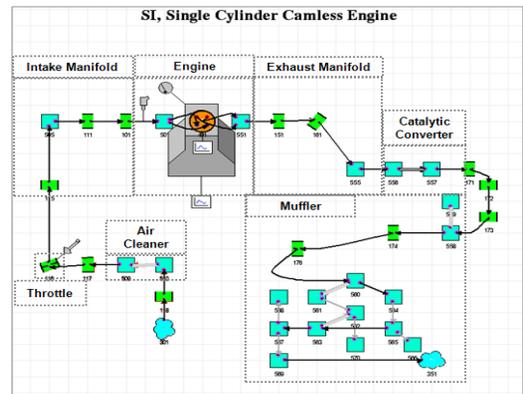


Fig.1 Wave model of Camless Engine system

Table 1. Camless Engine Specification

Specification	Description
Engine type	Single Cylinder, DOHC, 4 valves
Bore (mm)	56.5
Stroke (mm)	49.5
Displacement (cc)	124.1
Compression Ratio	11.8:1
Valve Lift (mm)	Intake Valve: 7.1 Exhaust Valve: 6.8
Baseline IVO / IVC	BTDC 26.5° CA / ABDC 55.0° CA
Baseline EVO / EVC	BBDC 66.3° CA / ATDC 23.6° CA

### 2.2.1 가변 압축비

일반적으로 흡기 밸브가 열려서 혼합기가 들어오고, 다시 흡기 밸브를 닫고 피스톤이 상승함에 따라 혼합기가 압축된다. 이때 흡기 밸브의 닫히는 시기를 조절하게 되면 실린더 내부의 압력을 변화시킬 수 있게 된다. Fig.2는 흡기 밸브의 닫히는 시기에 따라서 피스톤이 하강할 때 진공상태가 되는 시점을 조절하게 되고, 진공상태에서의 피스톤이 하강하고 상승할 때의 부하가 서로 상쇄되어 실제로 피스톤이 혼합기를 압축할 수 있는 비율이 변하게 되는 것을 나타낸다.

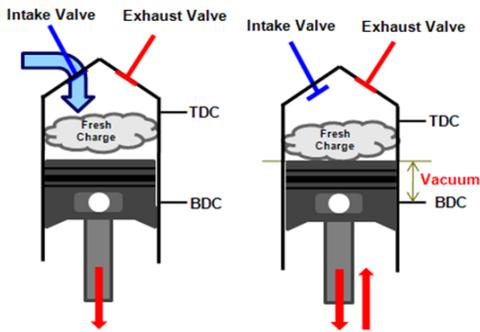
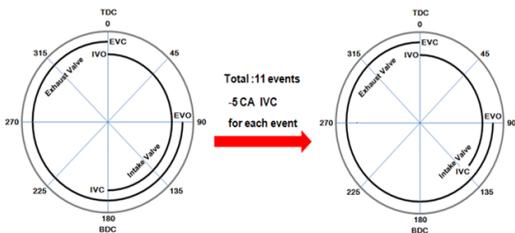


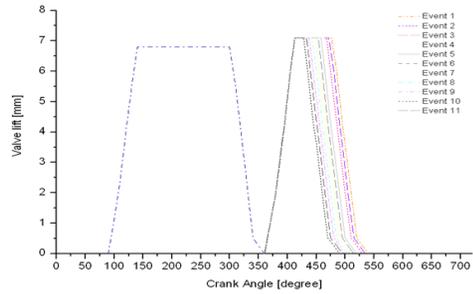
Fig.2 Variable Compression Ratio according to the IVC timing

### 2.2.2 압축비 변화에 따른 해석조건

압축비의 변화에 따른 영향을 파악하기 위하여 Fig.3에 나타난 것과 같이 배기 밸브의 개폐 시기는 고정시키고, 흡기 밸브의 닫히는 시기를 BDC 부터 5° 씩 진각 시켜 총 11개의 Event에 걸쳐서 실험하였다. 또한 실린더 내부에 남아 있는 잔류가스의 영향을 최소화하기 위하여 흡기 밸브와 배기 밸브 사이의 오버랩을 두지 않았고, 배기 밸브는 상사점에서 닫힌다.7)



a - Valve timing chart



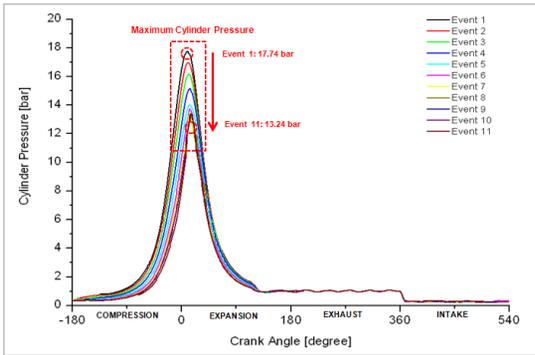
b - Valve timing profile

Fig.3 A valve timing event for Variable Compression Ratio

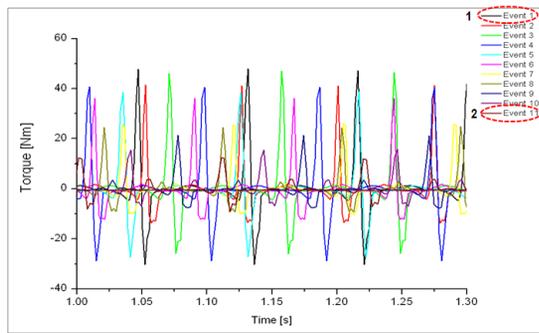
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 가변 압축비에 따른 실린더 압력 및 순간토크 변화

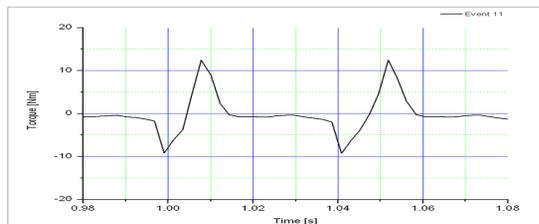
Fig.4는 배기밸브는 고정시키고, 흡기 밸브의 닫히는 시기를 크랭크 각 기준으로 50°까지 진각 시켰을 때의 실린더 내부의 압력변화를 나타낸다. 흡기밸브의 닫히는 시기를 크랭크 각 기준으로 5° 씩 진각 시킴으로서 실린더 내부의 최고 압력 변화는 총 11개의 Event 동안 17.74bar에서 13.24bar로 25.37% 감소하였다. 이는 압축비의 변화가 실린더 내부의 압력에 직접적으로 영향을 끼친 것으로 판단된다. 또한 흡기 밸브의 닫히는 시기가 진각 될수록, 실린더 내부의 최고 압력이 감소하게 되어 결국 출력 역시 떨어지게 된다. 이를 확인하기 위해 Fig. 5와 Fig.6에 가변 압축비에 따른 순간토크의 변화를 나타내었다. 먼저 Fig.5는 총 11개의 Event 동안 발생한 순간토크 변화를 나타내고 있는데, 흡기 밸브가 진각 될수록 순간토크가 감소하였다. 이는 Event 1과 Event 11을 확대해서 비교해 놓은 Fig.6에서 자세히 확인할 수 있다. Event 1에서는 최대순간토크가 47.9Nm, Event 11에서는 12.04Nm를 기록하였다. 이것은 높은 출력을 필요로 하지 않는 공회전 상태에서 가변 압축비를 이용하게 되면 상당량의 연료 소모량을 개선시킬 수 있음을 의미한다.



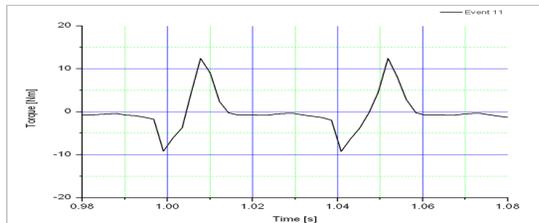
**Fig. 4 Cylinder pressure for Variable Compression Ratio**



**Fig. 5 Engine Torque for Variable Compression Ratio**



**a - Event 1**

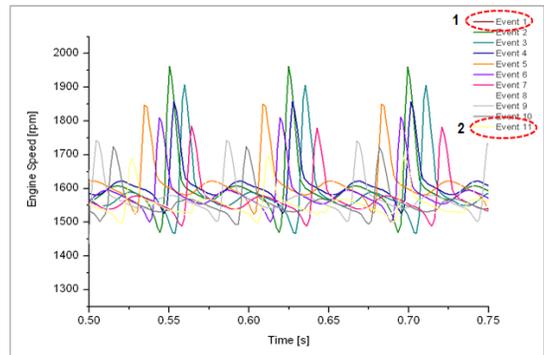


**b - Event 11**

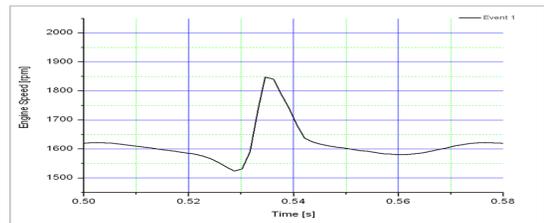
**Fig. 6 Engine Torque for Event 1 and Event 11. Close up #1 and #2**

### 3.2 가변 압축비에 따른 공회전속도 안정성

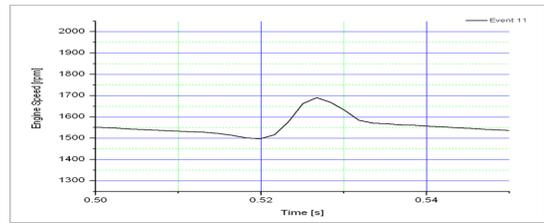
Fig. 7은 가변 압축비에 따른 엔진속도 변화를 나타낸 결과이다. Fig. 7을 보면 흡기밸브의 닫히는 시기가 진각 될 수록 공회전 상태에서 엔진 속도의 변화 폭이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 실린더 내부의 압력이 감소하여 최대순간토크가 감소된 결과로 판단된다. 결과적으로 흡기 및 배기 밸브의 개폐시기를 독립적으로 제어할 수 있는 캠리스 엔진의 장점을 이용하여 압축비를 가변시켰고, 이 영향으로 공회전 상태에서 엔진속도의 안정성이 향상됨을 알 수 있다. Fig. 8은 Fig. 7의 Event 1과 Event 11을 비교하기 위해 확대하였다.



**Fig. 7 Engine Speed for Variable Compression Ratio**



**a - Event 1**



**b - Event 11**

**Fig. 8 Engine Speed for Event 1 and Event 11. Close up #1 and #2**

### 3.3 가변 압축비에 따른 연비 및 배기가스 변화

Fig.9는 가변 압축비에 따른 연료소비율을 나타낸다. 흡기밸브의 닫히는 시기를 진각 시킬수록 연료 소비율이 0.47kg/kwh에서 0.426kg/kwh로 약 9.6% 감소하였다. 이는 흡입 밸브의 닫히는 시기를 진각 함에 따라 혼합기가 실린더 내부로 분사되는 양이 감소하였고, 높은 출력을 필요로 하지 않는 공회전 상태에서 가변 압축비를 통하여 엔진 속도의 안정화 및 순간토크의 감소로 인한 결과로 판단된다.

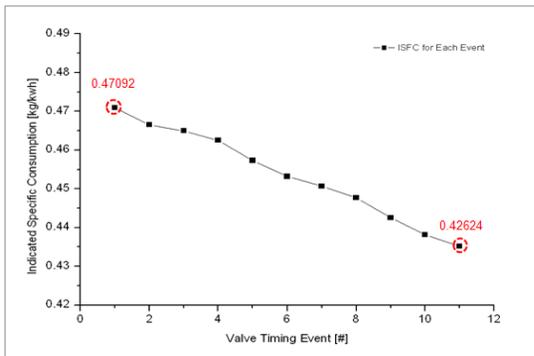


Fig.9 Indicated Specific Fuel Efficiency(ISFC) for Variable Compression Ratio

Fig.10은 가변 압축비에 따른 실린더 내부의 온도 변화를 나타낸다. 총 11개의 Event 동안 2041.98 K에서 1827.9 K로 약 10.48% 감소하였다. 이는 흡기 밸브의 닫히는 시기가 변함에 따라서 실린더 내부의 최대압력이 감소하였고, 그로 인해 폭발 행정 때 발생하는 최대온도 역시 감소된 결과이다.

Fig.11은 가변압축비에 따른 NOx 및 HC의 변화를 나타낸 그림이다. Fig.11에서 보듯이 HC의 양이 거의 변하지 않는 것을 확인할 수 있는데, 이는 흡기 밸브와 배기 밸브 사이의 오버랩이 발생하지 않아 실린더 내부에 남아있는 잔류 가스양이 일정하기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 NOx의 경우 압축비가 변함에 따라서 약 38.9% 감소하였다. NOx의 감소는 Fig.10에 나타난 것과 같이 연소 온도가 감소함에 따라서 이루어진 것이다.<sup>8)9)</sup>

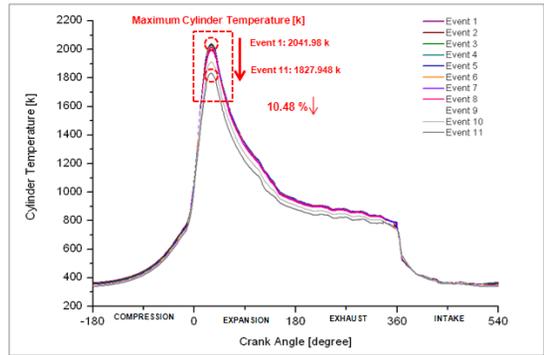


Fig.10 Cylinder temperature for Variable Compression Ratio

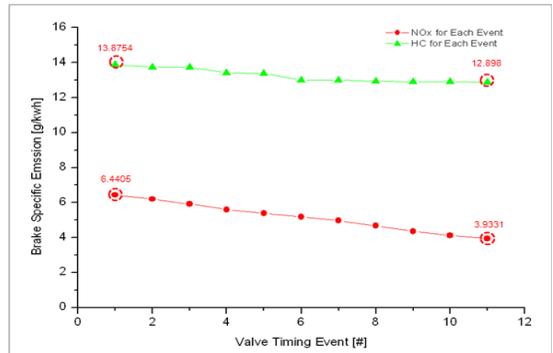


Fig.11 Emissions for Variable Compression Ratio

## 4. 결론

공회전 시 흡기 밸브의 닫히는 타이밍 변화에 의한 압축비의 변화 및 그에 따른 성능특성에 대한 분석을 수행하였으며, 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 흡기 밸브의 닫히는 타이밍을 진각시킴에 따라 직접 적으로 실린더 내부의 압력이 감소하였다. 특히 최고압력이 눈에 띄게 감소하는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 가변 압축비를 통한 실린더 내부의 압력 감소는 엔진의 출력에도 영향을 미쳐, 순간토크가 상당히 감소하였다.
- 3) 공회전 상태에서 흡기 밸브의 닫히는 타이밍이 진각 됨에 따라 엔진 속도의 변동 폭이 상당히 감소하였다.

- 4) 가변 압축비를 통하여 연료 소비율을 약 9.6% 감소시킬 수 있었다.
- 5) 실린더 내부의 온도가 흡기 밸브의 닫히는 타이밍이 진각 됨에 따라 감소하였고, 그 결과 NO<sub>x</sub>가 상당량 감소하였다.

### References

- 1) D. S. Kim, J. Y. Lee, Y. H. Lee and Y. G. Cho, "Variation of Exhaust Gas Temperature with the Change of Spark Timing and Exhaust Valve Timing during Cold Start Operation of an SI Engine", Spring Conference Proceedings, Vol .I, KSAE, pp. 58-64, 2004
- 2) Michael M. Schechter and Michael B. Levin, "Camless Engine", SAE paper 960581
- 3) M. Battistoni, L. Foschini, L. Postriotti, M. Cristiani, "Development of an Electro-Hydraulic Camless VVA System", SAE paper 2007-24-0088, 2007
- 4) J. Allen and D. Law, "Production Electro-Hydraulic Variable Valve-Train for a New Generation of I.C Engines", SAE paper 2002-01-1109, 2002
- 5) T.G. Leone and M. pozar, " Fuel Economy Benefit of Cylinder Deactivation - Sensitivity to Vehicle Application and Operating Constraints", SAE paper 2001-01-3591, 2001
- 6) R. Fiorenza, E. Torella, M. Pirelli, P. Pallotti, Paul E. Kapus, G. Kokalj, M. Lebenbauer, "VVT+Port Deactivation Application on a Small Displacement SI 4 Cylinder 16v Engine: An Effective Way to Reduce Vehicle Fuel Consumption", SAE paper 2003-01-0020, 2003
- 7) Haken Sandquist and Johan Wallesten, Karin Enwald and Stefan Stromberg, "Influence of Valve Overlap Strategies on Residual Gas Fraction and Combustion in a Spark-Ignition Engine at Idle", SAE paper 972936, 1997
- 8) Lucien Koopmans and Ingemar Denbratt, "A Four Stroke Camless Engine, Operated in Homogeneous Charge Compression Ignition Mode with Commercial Gasoline", SAE paper 2001-01-3610, 2001
- 9) J. Y. Jang, K. T. Yeom and C. S. Bae, "Effect of Various Intake Valve Timing Conditions and Exhaust Throttle on the Residual Gas Fraction and Exhaust Emission in an SI Engine", KSAE, pp. 65-70, 2004