

흡/배기 밸브의 디액티베이션에 따른 토크 및 연료소비율 변화

고종민·최세범

한국과학기술원 자동차기술대학원

The change of torque and sfc according to intake and exhaust valve deactivation

Jongmin Koh · Seibum Choi

Graduate School of Automotive Technology, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 373-1, Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Republic of Korea

Abstract : Camless engine uses intake and exhaust valve driven by hydraulic or magnetic valvetrain instead of mechanical camshaft valvetrain. Camless engine is able to control valve lift, valve duration, valve phase and firing order, and to deactivate cylinder. As the result it can optimize fuel efficiency, performance and emission for any operating condition.

The purpose of this research is to investigate the change of torque and specific fuel consumption according intake and exhaust valve deactivation using commercial engine analysis software Wave and Matlab-Simulink.

Key words : camless engine(캠리스 엔진), sfc(specific fuel consumption, 연료소비율), EMV(electromechanical valvetrain), VVT(variable valve timing, 가변밸브타이밍), SI(spark ignition, 불꽃점화), DOHC(double overhead camshaft)

Nomenclature

P : pressure, N/m²

T : absolute temperature, K

R : 287 J/kg · K

\dot{m}_f : mass flow rate of fuel, kg/s

CAD : crank angle degree, degree

RPM : revolutions of minute

$bmeP$: brake mean effective pressure, N/m²

1. 서론

고종민, kohjongmin@kaist.ac.kr.

내연기관에서 흡/배기 밸브의 역할은 연료의 효율 증대, 배기가스 저감, 엔진의 성능 향상을 시키는데 중요한 역할을 한다.

기존의 흡/배기 밸브는 기계적인 캠축에 의한 캠의 형상에 따라서 고정적인 밸브 움직임을 갖는다. 비록 가변 밸브 타이밍(VVT), 가변 흡기 장치 등 기계적 캠축에 변화를 주어서 흡/배기 밸브의 움직임을 조절하는 경우도 있으나 그 변화의 폭은 매우 제한이 된다.¹⁾ 이에 반해서 유압 혹은 전자석을 이용한 EMV(electromechanical valvetrain)는 흡/배기 밸브의 양정, 위상, 폭 등을 자유자재로 조절함으로써 기존의 밸브의 한계를 뛰어 넘었다.

이러한 EMV를 장착한 엔진을 캠리스 엔진

(camless engine)이라고 하는데, 캠리스 엔진의 장점은 대단히 많다. 밸브 열림/닫힘 타이밍 조절, 밸브 양정 조절, 밸브 열림기간 조절, 밸브 개폐속도 조절, 밸브 디액티베이션, 점화순서 조절, 2행정엔진으로의 변환 등 각 운전영역에 최적화되게 밸브 움직임을 조절할 수 있다. 심지어는 SI엔진에서 스로틀을 사용하지 않으면서 공기량을 조절함으로써 펌핑 로스를 줄일 수 있다.²⁾⁶⁾

본 연구에서는 다양한 운전영역에서 흡/배기 밸브의 디액티베이션에 따른 가솔린엔진의 연료소비율 및 토크의 변화에 대해 알아보는 것을 목적으로 한다.

2. 엔진 모델링 및 제원

엔진에 대한 모델링은 Ricardo에서 나온 Wave를 사용하였다. Wave는 1D를 기반으로 한 엔진시뮬레이션 전용 소프트웨어로서 실제에 가까운 엔진모델링이 가능해서 다양한 운전조건에 따른 엔진의 성능 및 배기가스 분석 등 사용자가 원하는 결과를 간단한 시뮬레이션을 통해 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다.

Wave와 더불어 사용한 프로그램은 MathWorks의 Matlab-Simulink이고 Wave와 연동해서 보다 다양한 조건에서 시뮬레이션을 가능하게 해준다.

2.1 시뮬레이션 모델링

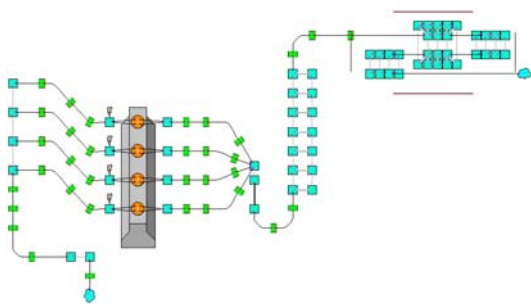


Fig. 1 Schematic of 4cylinder DOHC engine model

엔진은 직렬 4기통 DOHC SI 엔진으로 배기량은 1,600cc이며 제원은 table 1과 같다.

흡기 밸브의 밸브지름은 28mm이며 양정은 12.6mm이다. 330CAD에 열려서 280CAD 동안 열려 있으므로 610CAD에 닫힌다.

배기 밸브의 밸브 지름은 24mm이며 양정은 8.65mm이다. 열림 시기는 105 CAD이고 300 CAD 동안 열려 있으므로 405 CAD에 닫힌다. 그러므로 밸브 오버랩기간은 330CAD~405CAD 이므로 75CAD 이다.

Table 1 Engine specification

No. of cylinder	4
Stroke per cycle	4
Engine type	Spark ignition
Bore×Stroke	78.1mm × 82mm
Connectin rod length	150 mm
Displacement	1.571mm ³
Compression raito	10.0
firing order	1-3-4-2

3. 시뮬레이션 및 결과해석

3.1.1 4사이클당 모든 실린더 디액티베이션

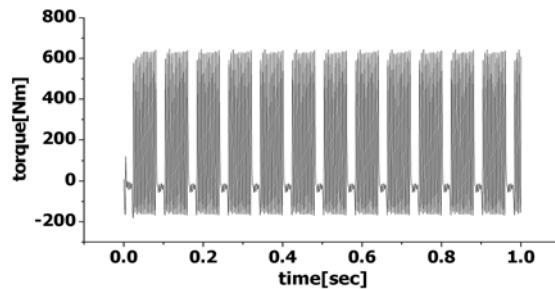


Fig. 2 Torque wave of 4cylinder deactivation per 4cycle

Fig. 2은 점화순서 1-3-4-2 직렬 4통 DOHC SI 엔진의 6000rpm에서 4사이클마다 4개의 실린더의 흡/배기밸브를 동시에 디액티베이션 한 순간토크 곡선의

결과이다. 4사이클 마다 4개의 실린더가 동시에 디액티베이션 되므로 4사이클 동안 12번의 고점 후 4번 동안 점화가 되지 않음을 결과로 확인 할 수 있다.

3.1.2 1사이클에서 1개의 실린더씩 순서대로 디액티베이션

Fig. 3은 같은 점화순서를 가지고 있고 6000rpm에서 4사이클 동안 1사이클에 1개의 실린더씩 디액티베이션 한 순간토크 곡선의 결과이다.

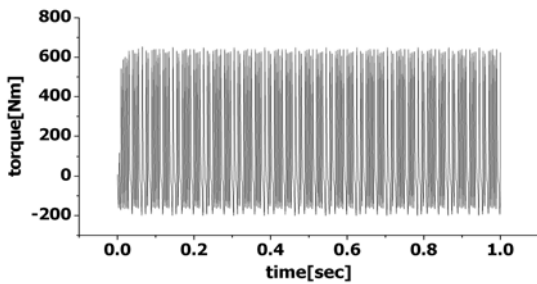


Fig. 3 Torque wave of 1cylinder deactivation per 1cycle

Fig. 2에 비해서 fig. 3이 토크의 분배가 고르므로 크랭크축에 걸리는 진동이 고르다는 것을 의미한다. 따라서 밸브 디액티베이션은 fig. 3과 같이 하는 것이 크랭크샤프트의 내구성 유지에 도움을 준다.

3.2.1 흡기 밸브를 1사이클 당 1개만 열 경우

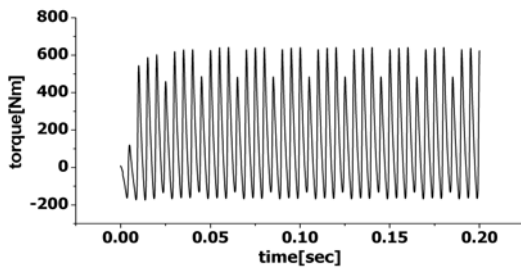


Fig. 4 Torque wave of 1valve deactivation at 6000rpm

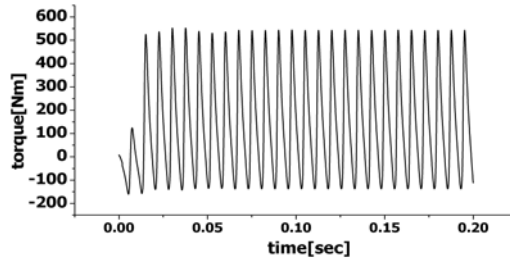


Fig. 5 Torque wave of 1valve deactivation at 4000rpm

Fig. 4는 6000rpm에서 0.2초 동안에 1번 실린더의 1개의 흡기 밸브를 디액티베이션 한 순간토크 곡선이고 fig.5는 4000rpm에서 같은 조건에서의 순간토크 결과이다. 두 그림을 비교해보면 알 수 있듯이 저속회전에서는 1개의 흡기 밸브만으로도 토크의 손실이 없이 실린더에 충분한 공기가 공급됨을 알 수 있다.

실린더 하나 당 공기의 출입을 최대한 많게 하기 위해서 현재의 상용엔진에는 보통 2개의 흡기 밸브와 2개의 배기 밸브를 가지고 있으나 저속에서는 흡기 밸브 2개를 모두 열 경우 과도한 연료의 소비가 발생할 수 있다. 이러한 연료 낭비를 줄이기 위해 일정속도 이하에서는 토크 손실 없이 하나의 흡기 밸브만을 열어서 연료소비량을 줄일 수 있다.

3.2.2 토크 변화

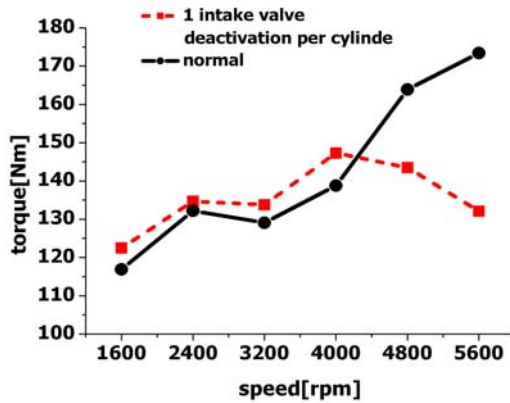


Fig. 6 Torque validation of 1-intake valve deactivation

각 실린더에 붙어 있는 두 개의 흡기밸브 중 하나
의 흡기밸브를 디액티브이션 했을 경우 토크변화를
보면 fig. 6과 같다. 1600rpm에서 800rpm 간격으로
5600rpm까지 6번의 시뮬레이션 해본 결과 두 개의
흡기 밸브를 열었을 경우 1%에서 6% 까지 토크가
작게 나왔다. 그러나 4000rpm 이상에서는 흡기밸브
를 디액티브이션 하지 않았을 경우에 최대 20% 이
상 토크가 높았다.

이는 저속에서는 흡기밸브 하나만으로도 연소에
충분한 공기를 공급할 수 있으나 고속으로 갈수록
공기를 흡입할 수 있는 시간이 짧아지므로 체적효
율의 감소로 두 개의 흡기 밸브를 모두 여는 것이
토크의 향상에 이득이 됨을 알 수 있다.

3.2.3 출력 변화

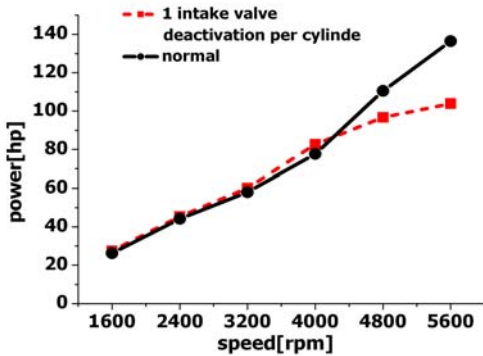


Fig. 7 Power validation of 1-intake valve deactivation

Fig. 7는 출력곡선이다. 출력은 1600rpm에서
4000 rpm 까지는 밸브를 하나만 열어도 오차가 7%
이내로 출력을 유지할 수 있으나 4000rpm 이상에서
는 두 개의 밸브를 모두 열었을 때 최대 20% 이상
출력의 향상을 보였다.

토크의 경우의 경우와 마찬가지로 이유로 강한 출
력을 얻기 위해서는 고회전에서 실린더에 흡기 공
기를 가능한 한 많이 공급해야 한다. 그러기 위해서
는 두 개의 흡기밸브를 모두 사용해야 한다.

3.2.4 연료소비율 변화

연료소비율은 다음과 같은 공식을 이용해서 계
산했다.

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{\dot{W}_b} = \frac{P \times n_v}{bmep \times R \times T \times AFR}$$

여기서 \dot{m}_f 는 연료유량, \dot{W}_b 동력출력, P 는 대기
압력, n_v 는 체적효율, T 는 대기온도, AFR 는 공연
비이다. 위의 공식을 이용해 연료소비율을 구해 그
래프로 그리면 다음과 같다.

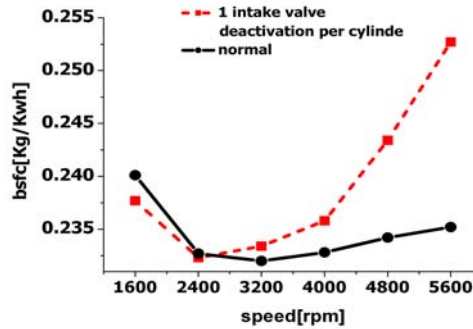


Fig. 8 bsfc validation of 1-intake valve deactivation

Fig. 8은 연료소비율 곡선이다. 1600rpm에서 2400
rpm 사이에서는 한 개의 흡기 밸브를 열 때 보다 두
개의 흡기밸브를 모두 열 때 연료소비율이 낮음을
알 수 있다. 그러나 2400rpm 보다 고회전에서는 한
개의 밸브만을 열 경우 연료소비율이 급격하게 높
아짐을 알 수 있다. 따라서 저회전에서는 필요이상
의 밸브작동을 하지 않음으로써 밸브마찰 손실을
줄일 수 있고 밸브에 쓰이는 힘을 줄임으로써 연료
소비율을 줄일 수 있다.

3.3.1 1 사이클 당 1개의 흡기/배기 밸브를 디액티브이션 할 경우

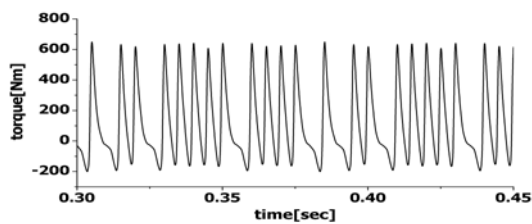


Fig. 9 Torque wave of 1cylinder deactivation per 1cycle

점화순서 1-3-4-2인 엔진을 1사이클마다 1번 실린더 부터 4번 실린더까지 순서대로 디액티베이션 했을 경우 순간 토크 곡선은 fig. 9와 같다.

4사이클마다 똑같은 토크 곡선이 반복되므로 밸브 디액티베이션을 하지 않을 경우 1사이클 당 4번 씩 피크토크가 나오고 4사이클에는 16번의 피크토크가 나오게 된다.

3.3.2 1 사이클 당 2개의 흡기/배기 밸브를 디액티베이션 할 경우

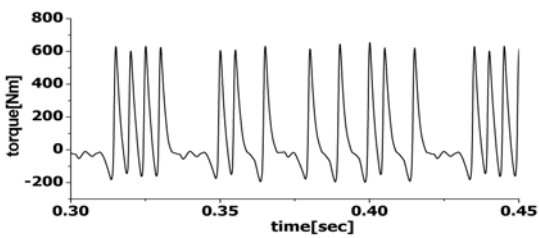


Fig. 10 Torque wave of 2cylinders deactivation per 1cycle

점화순서 1-3-4-2인 엔진을 1사이클마다 서로 다른 2개의 실린더를 디액티베이션 했을 경우 순간 토크 곡선은 fig. 10과 같다. 6사이클마다 반복된다.

5-4-1-2의 피크토크가 나온 후 사이마다 한 번씩 토크가 나오지 않는다.

3.3.3 연료소비율 변화

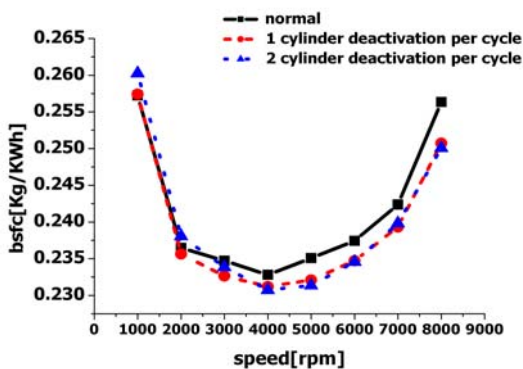


Fig. 11 bsfc validation of 1cylinder and 2cylinders deactivation per 1cycle

3000rpm에서 8000rpm에서는 1개 혹은 2개의 실린더를 디액티베이션을 경우에 밸브를 모두 정상적으로 작동했을 때 보다 연료소비율이 낮았으나 2000rpm 이하에서는 두 개의 밸브를 디액티베이션 했을 경우에 오히려 연료소비율이 높아졌다.

또한 1000 rpm이하에서도 한 개의 밸브를 디액티베이션 했을 경우에 밸브를 모두 정상적으로 작동했을 때 보다 연료소비율이 높아졌다.

실린더 디액티베이션은 배기량을 줄이는 것과 같은 효과를 본다. 일반적으로 배기량이 큰 엔진 일수록 연료소비율이 높다. 같은 엔진에서 실린더를 디액티베이션 한 결과 2000rpm 이상에서는 정상적으로 작동시 보다 연료소비량이 작게 나왔으므로 각 운전조건과 도로 상황에 따른 운전전략이 필요하다고 판단된다.

3.4.1 배기밸브의 영향

흡기 밸브 디액티베이션 할 경우 배기밸브를 흡기밸브와 같이 배기밸브를 디액티베이션 경우와 배기밸브는 항상 열어 놓는 방법이 있다.

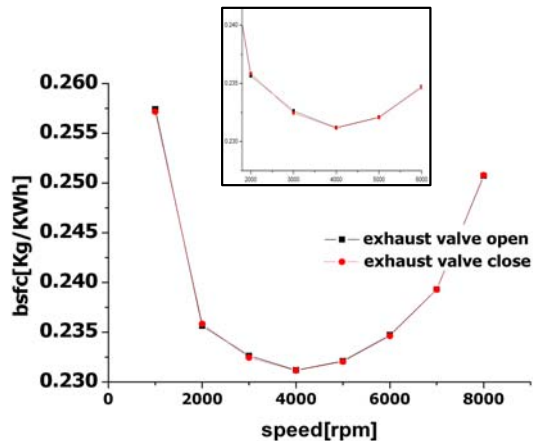


Fig. 12 bsfc validation of close and open exhaust valve per 1cycle

3000rpm부터 8000rpm 까지 연료소비율을 보면 배기 밸브를 닫을 경우 배기 밸브를 열 때보다 연료 소비율이 조금이나마 작음을 알 수 있다. 이것은 배

기 밸브를 열어 놓을 경우에는 피스톤 행정 시 좁은 배기 밸브 사이로 넘나드는 공기의 마찰 때문에 배기 밸브를 열 경우보다 보다 연료의 소비량이 많음을 알 수 있다. 이러한 공기저항은 엔진회전 속도가 빨라질수록 커진다.

그러나 2000 rpm 이하에서는 오히려 배기 밸브를 열어 놓았을 때의 연료소비율이 배기 밸브를 열어 놓았을 때보다 연료소비율이 작았다. 이는 실린더 내 피스톤의 마찰 저항이 배기 밸브를 넘나드는 공기의 저항보다 크기 때문이다.

4. 결 론

캠리스 엔진에서 가장 적용 중 하나인 흡/배기 밸브의 디액티브이션에 따른 토크 변화 및 연료 소비량을 시뮬레이션을 통해 결과를 보았다.

- 1) 1사이클에 모든 실린더를 디액티브이션 하는 것 보다는 1사이클 마다 서로 다른 실린더를 디액티브이션 하는 것이 토크 곡선을 확인해 본 결과 큰 출력을 보이므로 크랭크축의 진동에 대한 내구성을 위해서는 1사이클마다 서로 다른 실린더를 디액티브이션 하는 것이 좋을 수 있다.
- 2) 저회전에서는 실린더 당 1개의 흡기 밸브만으로도 출력의 저감 없이 충분한 공기의 출입이 가능하므로 연료의 소비량을 줄이기 위해서는 1개의 흡기 밸브만을 사용해야 한다.
- 3) 1사이클에 1개의 실린더를 디액티브이션 할 경우와 1사이클에 2개의 실린더를 디액티브이션 할 경우에 엔진 회전수에 따라 다른 연료소비율을 보였다. 다양한 운전영역과 도로조건에 따른 운전전략의 수립이 필요 하다.
- 4) 실린더를 출입하는 공기저항과 피스톤의 마찰저항을 고려할 때 2000rpm이하의 저속에서는 피스톤의 마찰 저항을 고려할 때 배기 밸브를 열어 놓는 것이 좋으나 고속의 회전에서는 배기 밸브를 닫아 놓는 것이 연료소비율에 이득이 된다.

References

- 1) Kitae Yeom, Jinyoung Jang, Choongsik Bae, "The Effects of Valve Timing on Engine Operating Parameters and Emissions in a VVT SI Engine", KSAE04-S0006, pp. 33-40, 2004
- 2) 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.
- 3) Paul E. Kapus, Dirk Denger, Trevor Holland, "Intelligent Simplification - Ways Towards Improved Fuel Economy", SAE Paper 2001-01-0236, 2001.
- 4) Michael M Schechter, Michael B Levin, "Camless Engine", SAE Paper 960581, 1996.
- 5) Nate R. Trask, Mazen Hammoud, Mohammad Haghgoie, Thomas W. Meglim, Wen Dai, "Optimization Techniques and Results for the Operating Modes of a Camless Engine", SAE Paper 2003-01-0033, 2003
- 6) 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.