

흡배기 밸브시기 동시 변경이 SOHC SI 엔진성능에 미치는 영향

엄인용^{*1)} · 이원근²⁾

서울산업대학교 기계공학과^{*1)} · 현대자동차 파워트레인연구소²⁾

The Effects of Valve Timing Dual Equal Retard/Advance on Performance in an SOHC SI Engine

Inyong Ohm^{*1)} · Wongeun Lee²⁾

^{*1)}Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

²⁾Research & Development Division for Hyundai Motor Company, 772-1 Changduk-dong, Whasung-si, Gyeonggi-do 445-706, Korea

(Received 31 July 2003 / Accepted 27 September 2003)

Abstract : Variable valve timing(VVT) mechanisms are used widely for improving fuel consumption and reducing emissions. Most of application, however, are limited in the DOHC engine. Dual equal retard/advance strategy is relatively simple one and can be applied to both SOHC and DOHC engines. In this study, effects of dual equal valve timing retard/advance are investigated to observe the feasibility of VVT system on an SOHC SI engine. The result shows that fuel economy and emissions are improved in the dual retard condition due to increased internal EGR. Some amount of increase in volumetric efficiency can be achieved by advancing valve timing at low speed and by retarding at high speed. In this case, however, full load power is not so much improved as the volumetric efficiency increases because of severe knock. In the dual advance condition, there is no merit in the fuel economy and emission.

Key words : Valve timing(밸브개폐시기), Dual equal retard/advance(동시 지각/진각), Internal EGR(내부 배기 재순환), Fuel economy(연비)

1. 서론

최근 강화되는 연비와 배기 규제에 대응하기 위하여 자동차용 엔진에 다양한 신기술들이 적용되어 시험되고 있다. 가솔린 직분 엔진, 소형 고속 디젤 엔진은 모두 이러한 노력 중의 하나이다. 그러나 이 엔진들이 향후 강화되는 배기 규제를 만족시키며 실용화되기 위해서는 희박연소 상태에서 질소산화물의 발생 억제 및 후처리 문제 등의 기술적 난제가 가로 놓여 있고, 이를 해결하기 위한 비용의 증가도

무시할 수 없는 문제이다.

한편 가변 밸브 기구는 원래 저속과 고속 영역에서 동시 출력 증대라는 목적을 위해 적용되기 시작했지만, 이를 통해 내부 EGR(exhaust gas recirculation) 양을 조절할 수 있다는 점을 이용해 현재에는 연비와 배기 개선을 위한 중요한 기술로 자리잡고 있다. 가변 밸브 기구를 이용할 때 연비 개선의 폭은 가솔린 직분식이나 포트 분사 희박 연소엔진보다 적으나 이론공연비 운전이 가능하므로 배기 저감에 유리하고 비용 증가가 상대적으로 적다는 장점이 있다. 이러한 기구는 초기에는 전 운전 영역에서의 성능 증대를 위하여 밸브 겹침 구간(valve

*To whom correspondence should be addressed.
iyohm@snut.ac.kr

overlap period)을 변화시키는 데 초점이 맞춰져 있었기 때문에, 주로 DOHC(double overhead cam shaft) 엔진에서 흡기 측의 밸브시기만을 조절하였으나,¹⁾ 현재는 연비저감 및 배기 개선까지 감안하여 DOHC 엔진의 흡배기 측 밸브시기 및 높이를 모두 변경시키는 가변 밸브기구까지 개발되어 있다.^{2,3)} 그러나 이러한 방법은 DOHC 엔진에만 적용이 가능하고 구동장치도 비교적 고가라는 단점이 있다.

이에 비하여 밸브 겹침 구간을 그대로 유지하면서 흡배기 시기 동시변경 (dual equal retard/ advance)을 하는 방법은 구동장치도 단순하고, 모든 형태의 밸브기구에 적용할 수 있다는 장점이 있다. 이 방법은 이미 단기통 엔진시험 등을 통하여 그 효과가 입증되고 제안되었으나,^{4,5)} SOHC(single overhead cam shaft) 엔진의 적용이 감소하면서 실제로는 적용된 예가 없다. 그러나 SOHC 엔진은 경차 등에 여전히 적용되고 있고, 개발도상국으로의 시장확대 및 전세계적으로 원가절감 경쟁이 강해지는 추세를 볼 때 그 중요성을 무시할 수 없다. 본 연구에서는 SOHC 엔진에서 흡배기 시기 동시변경을 통한 전부하 성능과 연비 및 배기 수준의 변화를 측정하고, 가변 흡배기 시기 변경도구 (VVT, variable valve timing)에 의한 연비저감 가능성을 평가하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 실험 대상 엔진

동시 진각/지각의 실험 대상의 엔진은 1.5 L SOHC 3 밸브 엔진으로 엔진의 사양은 Table 1에 제시하였다.

엔진의 흡기 포트는 두 개의 포트 중 한쪽이 고와류를 유도하기 위한 나선형 포트로 제작되어 있어 전부하 시험 시에는 매니폴드 쓰로틀링 밸브(MTV, manifold throttling valve)를 개방하여 두개의 포트를 동시에 사용하여 유량을 확보할 수 있게 하였고, 부분부하 시험 시에는 MTV로 직선 포트를 쓰로틀링하여 나선 포트만 사용하였다. 이와 동시에 축상성층화(axial stratification)에 의한 연소 안전성을 도모하기 위하여 연료 분사를 흡기 행정 중에 실시하였는데, 본 실험에서는 연료분사종료 시기를 최적 분

Table 1 Engine specifications

Bore		75.5 mm
Stroke		83.5 mm
Valve	In.	1 Straight 1 Helical
	Ex.	1
Compression ratio		9.6
Valve timing		12/52 52/12
Combustion chamber		Pent Roof

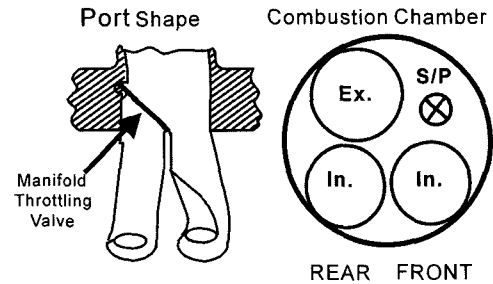


Fig. 1 Schematics of combustion chamber and port

사시기인 흡기 TDC 후 115CA(crank angle)로 설정하였다. Fig. 1에 연소실 형상과 포트의 형상을 도시하였다. 배기 시스템은 UCC(underflow catalytic converter)가 장착된 실차 배기계를 사용하였다.

2.2 실험 방법

SOHC 엔진의 밸브 시기를 동시에 진각 또는 지각시키기 위해 캠 스프로킷을 가공하여 기준 위치를 바꾸는 방식으로 시기를 변경하였다.

Fig. 2에 각각 표준 밸브 시기와 12도 동시 진각/지각의 밸브 개폐시기를 도시하였다. 동시 지각은 12도와 24도의 두 경우를, 동시 진각은 상향하는 피스톤과 흡기 밸브의 간섭을 방지하기 위해 12도의 경우에 대해 실험하였다. 전하 시험은 공연비를 최

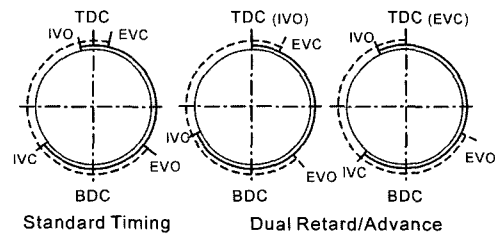


Fig. 2 Dual equal retard/advance valve timing

대출력 공연비인 13으로 고정하고 점화시기는 최적 점화시기인 MBT(minimum spark advance for best torque) 또는 MBT 전에 노킹이 일어나는 경우에는 노킹 발생점 DBL(detonation border line)에서 2도를 지각한 DBL-2도로 하였다. 부분부하는 2400 rpm, 2.3 bar BMEP(brake mean effective pressure)에서 공연비 변경 시험법(mixture response test, A/F swing test)으로 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전부하

Fig. 3에 동시 지각 및 진각에 따른 BMEP와 체적 효율을 그리고 Fig. 4에 점화시기와 연비를 각각 나타내었다. 시험대상 엔진은 SOHC이기 때문에 캠 축 변위에 의한 VVT를 적용한다면 흡배기 시기를 동시에 변화시킬 수밖에 없다. 이러한 동시 변경이 전부하 성능에 미치는 영향은 주로 흡기 밸브 닫힘(IVC, intake valve closing) 시기의 영향에 의한 것으로 알려져 있다.^{4,5)}

먼저 동시 진각의 경우 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 저속출력과 그때의 체적효율이 약간 상승하나 고속출력은 크게 떨어진다. 이것은 IVC가 진각되어 저속영역의 체적효율은 증가하고 고속 영역의 체적효율은 감소하였기 때문에 나타난 현상으로 사료된다. 본 실험에서 전부하 시험 전체에 걸쳐 점화시기가 MBT에 이르지 못하였고, 따라서 도시된 점화

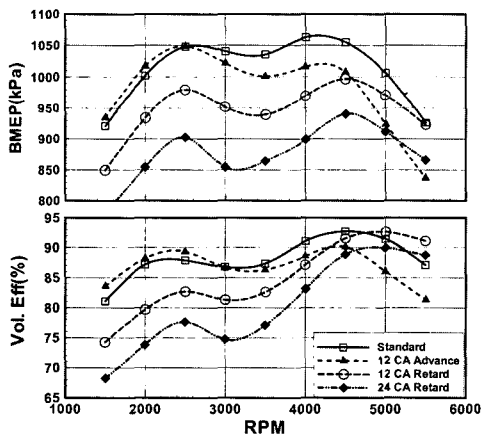


Fig. 3 BMEP & volumetric efficiency according to valve timing

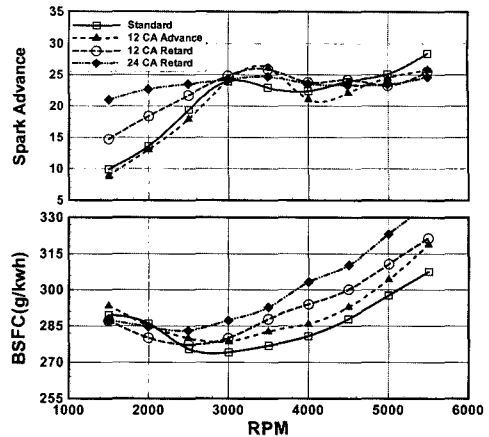


Fig. 4 BSFC & spark advance according to valve timing

시기는 모두 DBL-2도를 나타낸다. 그림에 나타난 DBL 특성으로 판단해 볼 때 점화시기는 저속에서 체적 효율의 증가 영향으로 노킹 특성이 악화되어 DBL이 약간 빨리 나타나는 것을 볼 수 있다. 연비는 전 운전 영역에 걸쳐 악화됨을 알 수 있고 고속일수록 그 차이는 더 커지고 있다.

12도 동시 지각의 경우 저속출력은 큰 폭으로 저하되고 고속출력은 최고 속도에서 표준 밸브 시기와 같아진다. 지각량이 24도로 커지면 저속뿐만 아니라 고속에서도 출력이 큰 폭으로 저하된다. 이것은 IVC가 지각되면 흡기 관성에 의해 고속에서의 흡입효율이 높아지고, 저속에서는 흡입된 공기가 흡기 쪽으로 다시 역류하여 체적효율이 떨어지는 것이 일반적이지만, 너무 큰 IVC 지각 상태에서는 고속에서도 흡입공기의 역류가 발생하여 전 영역에서 체적효율이 저하되기 때문이라고 판단된다.

지각의 경우 최고속도에서 체적효율의 증가에도 불구하고 출력 개선이 없는 것은 노킹 특성의 악화로 사료되는 바, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 점화시기가 MBT에 더 근접하지 못한 결과로 판단된다. 반면 저속에서는 지각량이 클수록 체적 효율 감소에 의한 유효 압축비 감소로 노킹이 완화되어 점화시기는 대폭 진각되지만, 점화 시기 진각에 의한 출력 증대보다는 체적 효율 감소에 의한 출력 감소가 상대적으로 더 크게 나타나 이를 극복하지 못하고 출력이 떨어진 것으로 판단된다.

Fig. 4에 나타낸 바와 같이 지각이 클수록 고속에

서 연비가 악화되는 경향이 있는데 이는 노킹 특성의 악화로 인해 점화시기를 지각하였기 때문으로 사료된다. 일반적으로 동시지각 조건에서는 고온의 잔류가스량이 증가하고 이로 인해 연소실의 온도가 상승하여 노킹이 악화되는 영향과, IVC의 지각에 따른 유효 압축비 감소에 의한 노킹 감소 효과가 모두 있다고 알려져 있는데,⁵⁾ 본 시험의 결과에서는 노킹이 악화되는 경향이 더 지배적인 영향을 미친 것으로 판단된다. 12도 지각의 조건에서는 고속에서의 체적효율 증대효과가 유효압축비 감소효과를 어느 정도 상쇄시킨 것으로 보인다.

12도 진각이나 24도 지각의 경우처럼 고속에서의 체적효율이 저하된 조건에서도 노킹 특성이 악화되는 것은, 밸브 시기의 변경이 내부의 유동 구조와 연료분포를 변화시켰기 때문으로 생각된다. 위에서 언급한 바와 같이, 본 시험에 사용된 헤드는 좌우 비대칭 헤드였고, 흡기 중 분사를 적용했기 때문에, 비대칭 포트에 의한 내부 유동과 연료 분포의 불균일이 연소에 불리한 방향으로 작용한 결과로 사료된다.

3.2 부분부하

Fig. 5에 동시 변경이 배기 특성 중 NOx와 HC에 미치는 영향을 그리고 Fig. 6에 연비와 흡기압에 대한 영향을 도시하였고 Table 2에 배기 특성과 연비를 이룬 공연비와 공연비 20에 대해 구체적인 수치로 서로 비교하여 나타내었다.

통상 부분부하에서 밸브 시기 변화에 의하여 연비와 배기 특성이 변하는 주요 원인은 흡기압(MAP: manifold absolute pressure)과 배기 재 유입 양이다. 즉 밸브 시기 변화에 의하여 MAP의 변동이 발생하여 흡기계 압력 강하가 달라지므로 흡입 손실이 변하여 연비에 영향을 미치고,⁶⁾ 잔류 가스로 작용하는 배기의 재 유입의 양과 기구가 변화하여, 이를 통해 배기의 특성이 변화하기 때문이다. 또한, 배기 밸브의 열림 시기 변화에 따른 팽창일(expansion work)의 변화도 연비에 영향을 주는 중요한 요소로 알려져 있다.

동시 진각과 지각은 모두 MAP과 배기 재 유입량 즉 잔류가스량을 변화시키나, 그 구조와 효과는 매

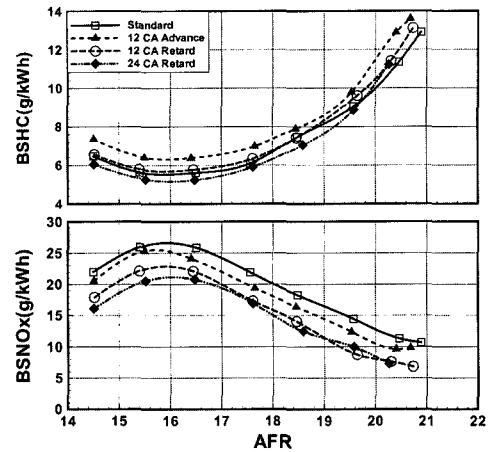


Fig. 5 Emission Characteristics according to valve timing

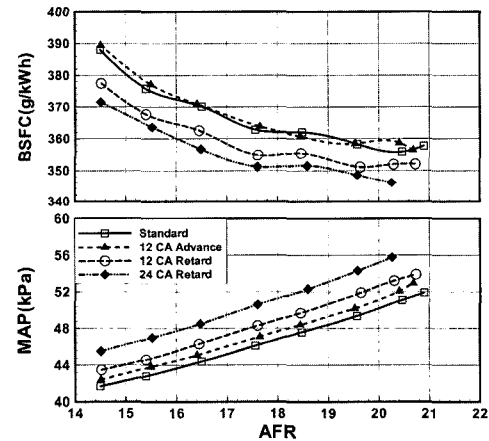


Fig. 6 BSFC & MAP according to AFR valve timing

우 다르다고 알려져 있다.

먼저 동시 진각의 조건에서 NOx의 양은 감소하지만 이론 공연비 부근에서 6.5% 정도로 그 감소 폭이 크지 않고 희박할수록 감소 폭은 15.7%로 증가하나 동시 지각에 비해서는 매우 적음을 알 수 있다. 또한 HC의 배출은 전 공연비 구간에서 10% 이상 증가하고 있음을 알 수 있다. 연비는 표준 상태와 비교할 때 거의 동일하거나 약간(0.4%) 악화되는 경향을 보이고 있고 MAP은 0.7-1.0kPa (1.7-1.9%) 정도로 약간 증가하고 있다. 연비를 제외하면 대체로 외부 EGR과 유사한 효과를 내고 있음을 알 수 있다.

본 실험에서는 동시 진각인 경우 피스톤이 올라가고 있는 상태에서 밸브 접침이 생기므로, 흡기관

Table 2 Variation of fuel economy and emission according to valve timing at Stoichiometric and A/F=20

Timing		BSFC	BSHC	BSNOx
STD	Sto.	387.2	6.41	22.22
	A/F=20	357.1	10.16	12.92
12 CA Advance	Sto.	388.8 (0.4% ↑)	7.31 (14.0% ↑)	20.79 (6.5% ↓)
	A/F=20	358.6 (0.4% ↑)	11.46 (12.9% ↑)	10.89 (15.7% ↓)
12 CA Retard	Sto.	377.0 (2.6% ↓)	6.52 (1.7% ↑)	18.08 (18.6% ↓)
	A/F=20	351.5 (1.6% ↓)	10.59 (4.2% ↑)	8.13 (37.1% ↓)
24 CA Retard	Sto.	371.0 (4.2% ↓)	6.05 (6.3% ↓)	16.30 (26.7% ↓)
	A/F=20	346.0 (2.8% ↓)	10.32 (1.6% ↑)	8.30 (35.8% ↓)

으로 유입되는 배기 가스의 양이 증가하여 MAP이 상승하여 흡기계의 압력 강하가 줄어들므로써 일단 흡입 손실은 감소한다. 이 역류된 배기 가스는 흡기관 내에서 온도가 저하된 후에 흡입 행정 중 실린더 내로 다시 유입되어 잔류가스량이 증가하게 된다. 연소된 기연가스의 재 유입 측면에서 보면 이러한 냉각된 기연 가스의 실린더 내 유입은 외부 EGR과 유사하며 동일 신선(fresh air) 유입량에 대해 유효압축비가 증가하여 효율이 개선되는 효과가 있다. 반면 배기 밸브가 일찍 열리므로 팽창일이 감소한다. 본 진각 실험의 경우에는 MAP의 상승이 1.5-2.0% 정도로 매우 적어 흡입 손실 감소효과가 미미하고 팽창일 감소의 효과가 유효 압축비 증가의 효과보다 더 크게 나타나 연비가 소폭 악화된 것으로 사료된다.⁷⁾

동시 지각의 경우 NOx 저감은 지각량이 커질수록 증가하여 24도 지각인 경우 이론 공연비에서 27% 그리고 공연비 20에서는 36%에 이른다. 이는 지각량이 커질수록 잔류가스량이 증가한 결과로 판단된다. HC는 12도 지각에서는 약간 증가하나, 더 지각시킨 24도의 조건에서는 공연비에 따라 상반된 경향을 보여 이론 공연비 부근에서는 감소하고 희박 영역에서는 증가한다. 지각의 경우도 진각과 마찬가지로 MAP 상승의 결과를 보여주고 있으며 지각량이 클수록 상승폭이 커져 12도 지각에서는 4%

정도 그리고 24도 지각에서는 9% 정도 상승한다. 연비는 진각에서 악화되거나 동등한 수준인데 비해 12도 지각에서 2.7%, 24도 지각에서 4.2%까지 개선된다. 지각량을 늘림에 따라서 연비 저감 폭은 둔화되지만, 24도 이후로도 더욱 저감될 가능성을 보여주고 있다.

동시 진각과 지각이 잔류가스량의 증가라는 측면에서 동일하지만 배기 특성과 연비 그리고 MAP 등이 상당히 다른 이유는 위에서 언급한 바와 같이 잔류가스량 증가의 구조와 효과는 매우 다르기 때문이라고 판단된다.

본 실험에서 동시지각은 피스톤이 내려오고 있는 상태에서 밸브 겹침이 생기므로, 배기가스는 배기관 내에서 연소실로 재 유입되고,^{8,9)} 이 가스(내부 EGR)는 냉각되지 않고 재산화(re-oxidization)되는 과정을 거친다. 따라서 냉각된 기연 가스가 연소실로 유입되는 구조, 구체적으로 외부 EGR 또는 동시진각과 같이 흡기관으로 역류되었다가 재 유입된 가스와는 다른 경향을 보인다. 즉 위에서 언급한 바와 같이 24도 지각에서 HC는 이론 공연비 부근에서는 감소하고 희박한 경우에는 증가하는데 이는 이론 공연비 부근에서는 내부 EGR에 의한 배기 재산화 효과에 따라 감소하고 희박한 경우 잔류가스량 증가에 따른 연소 특성 악화가 더 지배적인 영향을 주어 소폭 증가한 것으로 판단된다.

결과적으로 잔류가스가 증가하는 기구가 서로 다르기 때문에, 동시지각은 내부 EGR의 고유의 장점을 보이게 되지만 동시진각은 외부 EGR과 유사한 특성을 보인다. 즉 내부 EGR에서는 외부 EGR과 달리 HC 배출이 동등하거나 오히려 감소하는 특징을 보여주는데 이는 외부 EGR에서는 잔류가스의 증가로 연소 특성이 악화되어 HC가 증가하는 반면 내부 EGR에서는 배기 포트에 배출되는 HC가 재산화된 후 유입되어 소폭이나마 HC가 줄어든 것으로 판단된다.

MAP의 상승은 흡기과정 말기에 IVC의 지각에 의해 이루어지고 팽창일이 증가하고 유효압축비가 감소하는데 지각의 경우는 흡입 손실 감소와 팽창일의 증가가 유효 압축비 감소의 효과보다 커서 연비가 개선된 것으로 판단된다.⁵⁾ 진각이나 지각의 경

우 모두 MAP 상승의 결과를 보여주고 있으나 지각으로 갈수록 상승폭이 크다. 이도 역시 위에서 언급한 바와 같이 밸브 겹침 구간 동안 배기가스가 흡기 쪽으로 역류되는 방식의 차이에 의한 것으로 판단되며, 동시지각의 경우 IVC 전에 흡기 측으로의 역류가 MAP을 더 많이 증가시킴을 나타내고 이렇게 증가된 MAP은 흡입 손실을 줄여 연비 개선에 기여하였다고 판단된다. 또한 역류된 가스의 재 유입으로 발생한 내부 EGR은 HC 재 유입에 의한 HC 감소, EGR 효과에 의한 NOx 감소, 그리고 가스 조성변화(3원자 가스 증가)에 따른 비열비 변화에 의한 연비 개선의 효과를 동시에 이끌어 내었다고 판단된다.

Fig. 7에는 점화시기와 BMEP COV(coefficient of variation) 측정의 결과가 나타나 있다. 일반적으로 EGR의 증가에 따라 연소 성능의 악화로 점화시기가 진각되는 경향이 있고 BMEP COV도 악화되는 경향이 있으나 본 실험의 경우 표준 상태와 크게 다르지 않음을 보여주고 있다. 즉 포트 쓰로틀링을 적용하고 최적 분사시기를 택한 경우는 흡배기 시기를 동시 변경하여도 연소안정성은 거의 변화가 없었으며 점화시기 진각의 폭도 비교적 적었다.

이상의 결과를 종합해 보면 SOHC 엔진에서도 연비 개선과 배기 감소를 위해 VVT 개념을 적용한 흡배기 동시 진각/지각은 충분히 가능성을 가지고 있다. 본 실험에서 진각과 지각을 12도 간격으로 하였기 때문에 최적의 진각, 지각량의 산정은 불가능하

였지만, 이 양을 최적화하면 개선의 여지는 더 있으리라고 판단된다.

또한 본 실험은 저속, 중속, 고속을 모두 고려한 표준적인 밸브 타이밍을 갖는 엔진을 대상으로 하였으므로 저속과 고속에서 흡입 효율 증가에 의한 노킹 특성의 악화에 의해 성능 개선의 폭은 미미하였으나 이 또한 밸브 열림 구간과 변위의 최적화를 통해 개선이 가능하다고 판단된다. 즉 VVT 적용을 목적으로 엔진 하드웨어 및 밸브 타이밍을 새로이 적용하면 그 개선의 폭은 더 커지리라 예상된다.

4. 결론

SOHC 3 밸브 엔진에 가변 밸브시기의 적용 가능성을 알아보기 위해 캠 위상 변위를 통한 동시 지각/진각 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 전부하 성능은 흡배기 동시 진각의 조건에서는 저속 토오크가 약간 증가하였으며, 동시지각의 조건에서 최대 속도부근에서 흡입 효율이 증가하였다.
- 2) 동시 진각과 지각은 저속 또는 고속 구간을 제외하고 대체로 전부하 연비가 악화되고, 노킹 특성이 악화되어 출력증가 효과가 없다.
- 3) 본 실험에서 동시 지각은 내부 EGR 효과가 크게 나타나 연비와 배기의 동시 개선이 가능한 반면 동시 진각은 외부 EGR과 유사하게 배기 중 NOx의 개선 효과만 발생하고 기타 배기 특성은 악화되었다.
- 4) 순수한 외부 EGR의 경우 연비가 개선되는 반면 잔류 가스 발생 기구가 유사한 동시 진각은 의한 연비를 개선시키지 못하였다.
- 5) 부분부하에서는 동시지각의 경우 24도에서 연비 4.2% 개선, HC 6.3%, NOx 26.7%가 각각 저감되었고 동시 진각은 연비가 0.4% 악화되었으며 HC는 14% 증가하였고 NOx는 6.5% 감소하였다.
- 6) 포트 쓰로틀링의 적용은 잔류 가스의 증가에 따른 연소 특성 악화를 방지하여 진각량과 지각량에 관계없이 안정된 부분부하 운전을 가능하게 한다.

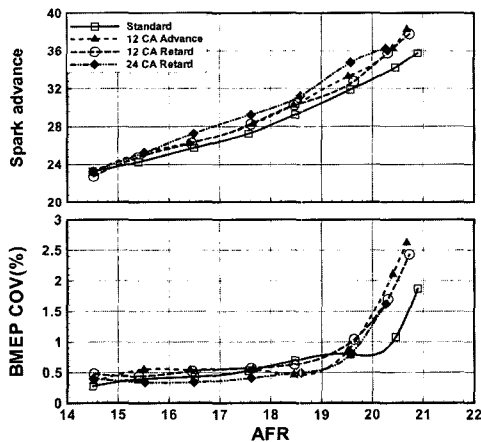


Fig. 7 Spark advance & BMEP COV according to valve timing

References

- 1) Y. Moriya, A. Watanabe, H. Uda, H. Kawamura, M. Yoshioka, M. Adachi, "A Newly Developed Intelligent Variable Valve Timing System - Continuously Controlled Cam Phasing as Applied to a New 3-Liter in-Line 6 Engine," SAE 960579, 1996.
- 2) F. Klein, M. Kühn, H.-J. Weimann, F. Wolpers, M. Krämer, J. Abthoff, "The Influence of the Valve Stroke Design in Variable Valve Timing Systems on Load Cycle, Mixture Formation and the Combustion Process in Conjunction with Throttle-Free Load Governing," SAE 981030, 1998.
- 3) J. G. Nam, "A Study on the Residual Gas Fraction in Cylinder by the Adjustment of Variable Valve Timing with Volumetric Efficiency," Transactions of KSAE, Vol.9, No.5, pp.82-88, 2001.
- 4) R. A. Stein, K. M. Galletti and T. G. Leone, "Dual Equal VCT - Variable Camshaft Timing Strategy for Improved Fuel Economy and Emissions," SAE 950975, 1995.
- 5) T. G. Leone, E. J. Christenson, R. A. Stein, "Comparison of Variable Camshaft Timing Strategies at Part Load," SAE 960584, 1996.
- 6) J. M. Ku, C. S. Bae, "Effects of Variable Valve Timing Operation Modes on Engine Performance", Transactions of KSAE, Vol.9, No.6, pp.24-29, 2001.
- 7) H. Sandquist, J. Wallesten, K. Enwald, S. Strömberg, "Influence of Valve Overlap Strategies on Residual Gas Fraction and Combustion in a Spark-Ignition Engine at Idle," SAE 972936, 1997.
- 8) C. S. Kim, H. B. Song, J. H. Lee, J. S. Yoo, H. S. Cho, "Effect of Valve Timing on Residual Gas Fraction and Combustion Characteristics at Part Load Condition in an SI Engine," Transactions of KSAE, Vol.8, No.4, pp.26-33, 2000.
- 9) H. S. Cho, J. H. Lee, J. S. Yoo, K. Y. Lee, "A Study on the Prediction Model of Residual Gas Fraction in SI Engines," Transactions of KSAE, Vol.7, No.3, pp.44-54, 1999.