

수소-천연가스엔진에서 밸브오버랩 감소가 배기특성에 미치는 영향

이성원* · 임기훈* · 박철웅** · 최 영* · 김창기*

* 한국기계연구원

Effect of Reduced Valve Overlap on Emission Characteristics of Hydrogen-Compressed Natural Gas Engine

Sungwon Lee*, Gihun Lim*, Cheolwoong Park**, Young Choi* and Changgi Kim*

* Korea Institute of Machinery and Materials

(Received April 28, 2014 ; Revised September 16, 2014 ; Accepted September 22, 2014)

Key Words: Hydrogen-compressed Natural Gas Blends(수소-천연가스 혼합연료), Camshaft(캠축), Valve Overlap(밸브오버랩), Emission Characteristics(배기특성), Thermal Efficiency(열효율), Excess Air Ratio(공기과잉률)

초록: 현행 배기가스규제인 유로6을 대응하기 위해선 질소산화물과 메탄의 배출량을 크게 저감시켜야 하는 실정이다. 본 연구에서는 부분부하운전조건에서 밸브오버랩 감소가 수소-천연가스엔진의 연소 및 배기특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 각 연료와 기존캠 및 밸브오버랩이 감소된 변경캠에 대하여 연소 및 배기특성을 분석하였다. 실험결과 변경캠을 사용하였을 때 열효율이 감소하고 연료유량이 증가하였다. 열효율 감소로 인하여 메탄과 이산화탄소의 배출량은 증가하였다. 희박한 운전조건에서 질소산화물 배출량은 기존캠 대비 감소하였다. 동일한 연료 및 운전조건에서는 효율과 배기특성에 악영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

Abstract: In order to meet the current emission regulations (EURO-6), it is necessary to significantly reduce CH₄ and NO_x emissions. This study investigated the effect of a reduction in the valve overlap on the combustion and emission characteristics of a hydrogen-compressed natural gas engine under a part-load operating condition. The combustion and emission characteristics were analyzed for each fuel using the original camshaft and an altered camshaft with reduced valve overlap. The results showed that the thermal efficiency was decreased and the fuel flow was increased when using the altered camshaft. The CO₂ and CH₄ emissions were increased as a result of the reduced thermal efficiency. Under lean operating conditions, the NO_x emission was decreased compared with one of the conventional camshaft. Thus, under the same fuels and operating conditions, it had a harmful influence on the emission characteristics and thermal efficiency.

1. 서론

대형버스 및 상용차의 배출가스에 의한 환경오염과 이산화탄소와 같은 온실가스를 저감하기 위하여 후처리 장치는 필수적인 요소가 되었다. 하지만 배기가스 규제가 강화됨에 따라 더욱 높은

전환효율을 요구받게 되면 귀금속 사용량 증가에 의하여 후처리장치의 비용이 상승하게 될 것이다. 또한 후처리장치의 전환효율을 무한정 증가시킬 수 없기 때문에 후처리장치에만 의존해서는 배기가스 규제를 대비하기 어려운 실정이다. 이에 따라 엔진기술과 더불어 친환경 대체에너지 개발이 이루어짐에 따라 가스엔저원에 대한 수요 및 공급이 지속적으로 증가하고 있다. 특히

† Corresponding Author, cwpark@kimm.re.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

수소는 미래에너지원으로 주목받고 있으며 가까운 미래에 가장 큰 비중을 차지할 것으로 예상되고 있다. 하지만 인프라 부족으로 인하여 사용이 원활히 이루어지지 못하고 있는 실정이다.^(1,2)

수소-천연가스(HCNG)엔진은 천연가스와 수소를 혼합한 연료를 사용하는 엔진 기술이며 사회적인 측면에서 HCNG엔진을 통한 부분적 수소사용은 수소 인프라를 구축하는 가교 역할을 할 것으로 기대되고 있다. 수소는 탄소가 없는 연료이기 때문에 HCNG연료를 사용하면 원천적으로 천연가스 대비 배기가스가 감소되는 효과를 기대할 수 있다. 또한 수소는 희박가연한계가 매우 넓기 때문에 희박연소를 통하여 연소효율을 증가시킬 수 있다. 희박연소에 의한 연소온도 감소를 통하여 질소산화물을 크게 저감시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다.^(3,4) 온실가스에 대한 관심과 우려가 커짐에 따라 이산화탄소 배출 규제도 고려해야 할 상황이기 때문에 열효율 향상을 통한 연비향상 측면에서도 주목받고 있다.^(5~7)

현행 배기가스 규제인 EURO-6을 만족하기 위해서는 이전 배기가스 규제 배출량 대비 질소산화물 배출량을 80% 저감시켜야 하며 메탄 배출량 역시 50% 저감시켜야 하는 실정이다. 이에 대응하기 위하여 이전 연구를 통해서 희박연소 및 점화시기 최적화 실험을 수행하였다. 점화시기 지각을 통하여 질소산화물의 배출량은 규제 값에 근접하였으나 메탄의 경우 점화시기와 무관하게 일정한 배출량을 보였다. 메탄은 매우 안정한 상태의 분자구조를 갖는 연료로서 수소원자와 탄소원자의 분리가 어렵기 때문에 배기규제를 만족하기 위한 고효율의 산화촉매 개발이 쉽지 않다.^(8~10)

이를 대응하기 위하여 캠축변경을 통한 밸브오버랩 감소효과를 검토하였고 그 결과 전부하 운

전조건 실험에서는 잔류가스의 영향으로 탄화수소계 배출가스가 50% 이상 감소함을 알 수 있었다. 전부하 운전조건에서는 탄화수소계 배출량 감소효과를 보였으나 상대적으로 터보차저에 의한 흡입공기압과 공기량이 낮은 부분부하 운전조건에서 밸브오버랩 감소에 의한 잔류가스 증가가 미치는 영향을 반드시 살펴볼 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 HCNG엔진 기술개발의 일환으로 변경된 캠을 적용한 엔진에서 밸브오버랩의 감소가 부분부하 운전조건에서 배기가스 배출량에 미치는 영향을 평가하여 밸브오버랩의 변경 적용가능성을 검토 하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구의 대상이 되는 실험엔진은 유로5를 만족하는 11L급 6기통 대형 천연가스엔진이며 엔진 제원은 Table 1에 나타내었다. Fig. 1은 와전류식 동력계(Schenck co.)에 연계하여 설치된 엔진을 포함한 실험장치의 전체적인 구성을 보여주고 있다. 기존의 연료시스템을 기반으로 하여 HCNG연료를 공급 및 제어할 수 있는 연료 공급시스템을 구성하였다.

체적이 큰 수소의 안정적인 공급을 위하여 여러 개의 용기를 병렬로 연결하여 설치하였다. 수소는 약 10 MPa로 충전된 고압수소가스용기를 통하여 레귤레이터 전단으로 공급이 이루어지며 약 0.7 MPa로 감압된 연료의 공급유량은 MFC(Mass flow controller)를 이용하여 제어된다. 천연가스는 약 20 MPa로 충전된 고압연료용기를 통하여 공급되며 레귤레이터를 통하여 0.7 MPa로 감압된다. 이때 연료의 팽창에 의한 냉각을 막기 위해 40℃로 제어되는 열교환기를 설치하였으며 연료유량은 MFM(Mass flow meter)을 통하여 측정된다. 천연가스와 수소의 혼합은 MFM으로 측정된 천연가스의 체적유량대비 비율로 수소의 체적유량을 MFC로 컨트롤하는 방법을 사용하였다. 혼합된 연료는 8개의 가스분사기가 하나의 모듈을 구성하고 있는 FMV(Fuel metering valve)와 믹서를 통하여 흡기매니폴드 전단으로 공급된다.

엔진 운전상태 확인 및 점화시기 등의 연소조건을 제어하기위하여 ECU(Engine control unit) 제어 프로그램(Woodward CO.)을 사용하였다. 전반적인 실험결과 데이터취득은 GL820(Graphtec Co.)을 통

Table 1 Engine specification

Type	Description
Number of cylinders	6 ea
Displaced volume	11.051 L
Bore	123 mm
Stroke	155 mm
Compression ratio	10.5:1
Max. power	213kW at 2100rpm
Max. torque	1150Nm at 1260rpm
Type of turbocharger	Waste gate

Table 2 Intake and exhaust valve timings for each camshaft

Camshaft	Intake valve (CAD)		Exhaust valve (CAD)		Valve overlap (CAD)
	Open at	Close at	Open at	Close at	
Original	BTDC 18	ABDC 34	BBDC 46	ATDC 14	32
Changed (reduced valve overlap)	BTDC 10	ABDC 42	BBDC 54	ATDC 6	16

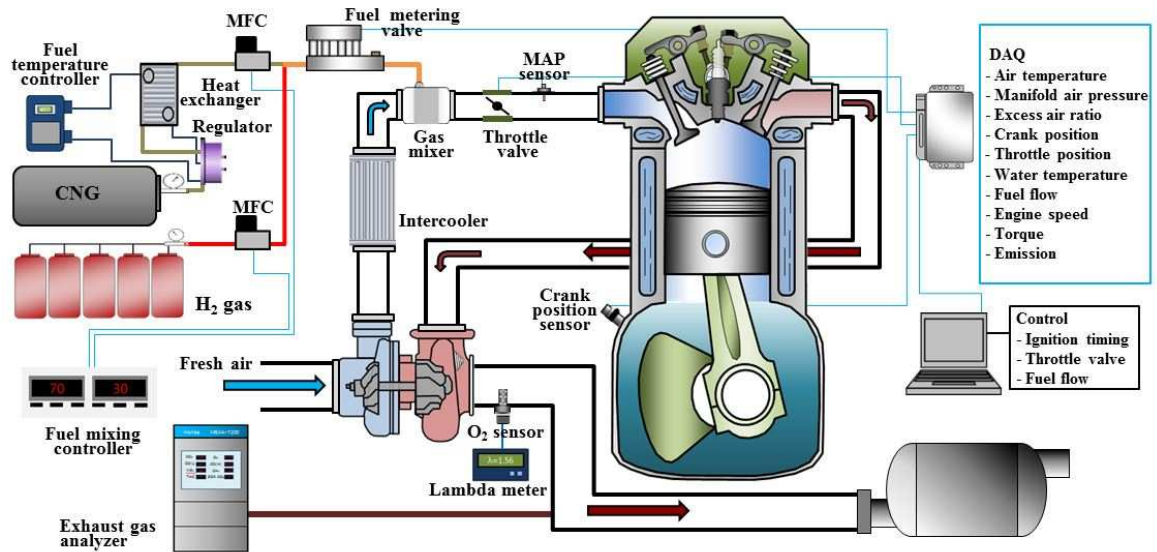


Fig. 1 Schematic of experimental setup

하여 이루어졌으며 실린더내부 연소압력데이터를 측정하기 위하여 점화플러그형 압력센서(Kistler CO.)와 엔코더 및 연소해석기(DEWETRON Co.)를 사용하였다. 배기분석기(AMA i60, AVL Co.)를 사용하여 주요 배출가스인 이산화탄소, 탄화수소, 메탄 및 질소산화물을 측정하였다.

밸브오버랩기간 감소를 위하여 캠축을 변경하였으며 캠축사양은 Table 2에 나타내었다. 기존캠은 32 CAD(Crank angle degree)의 오버랩기간을 가지고 있으나 변경된 캠은 16 CAD로 오버랩기간이 50% 감소한 사양이다.

2.2 실험 방법

밸브오버랩 감소가 부분부하 운전조건에서 연소 및 배기특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 1,260 rpm, 575 Nm의 운전조건에서 실험을 수행하였다. 각각의 공기과잉률 조건에서 실화(mis fire)가 발생하기 전까지 점화시기를 2 CAD 씩 진각 시켜가며 최대 열효율을 나타내는 MBT(Minimum advance for Best Torque) 점화시기를 찾아 비교하였다. 모든 실험은 엔진이 충분히

예열된 상태에서 진행하였으며 모든 운전조건에서 엔진냉각수온도($82.5 \pm 2.5^\circ\text{C}$)와 흡입공기온도($40 \pm 2.5^\circ\text{C}$)를 유지할 수 있는 수온 조절 시스템과 인터쿨러를 구성하였다.

수소의 혼합비율은 이전의 연구를 통하여 최적 혼합비로 판단된 HCNG30(CNG 70Vol%, H₂ Vol30%)을 사용하였다.⁽¹¹⁾

3. 실험결과

Fig. 2는 공기과잉률(λ) 변화에 따른 각 연료 및 캠축에서의 연료유량을 보여주고 있다. 밸브오버랩이 감소한 변경된 캠을 사용했을 경우 동일 운전조건에서 연료유량이 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 열효율 감소를 의미하며 실린더 내의 잔류가스에 의하여 연소안정성이 악화되어 열효율이 감소한 것으로 판단된다. 또한 연소안정성 악화로 인하여 기존 캠의 희박한계 운전조건인 천연가스는 $\lambda=1.7$, HCNG30은 $\lambda=2.0$ 에서 실화가 빈번하게 발생하였다. 이에 따라 MBT 점화시기가 기존 캠 대비 지각되어 열효율이 급감하고 연료유량이 급격히 증가함을 확인할 수 있다. 연

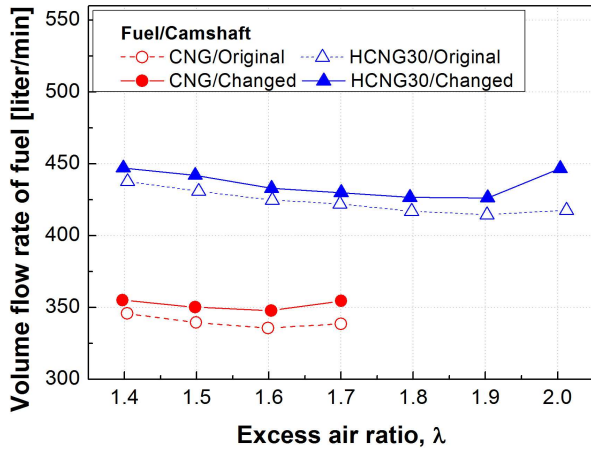


Fig. 2 Fuel mass flow rate in relation to excess air ratio using each camshaft

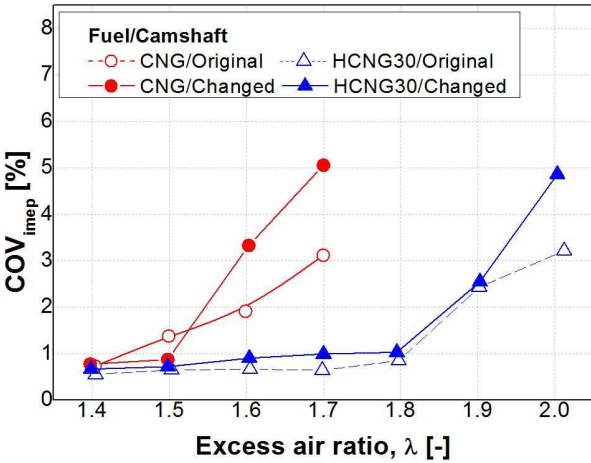


Fig. 3 Coefficient of variation on indicated mean effective pressure (COV_{imep}) in relation to excess air ratio using each camshaft

료유량 증가폭을 살펴보면 천연가스는 운전 가능한 공기과잉률 면에서 평균 3.1% 증가한 반면 HCNG는 평균 2.3% 증가한 것을 볼 수 있었다. 이는 수소의 빠른 화염전파속도에 기인한 결과로 판단되며 변경된 캠을 사용함에 있어 HCNG30 연료가 더 적합함을 알 수 있다.

Fig. 3은 연소안정성을 나타내는 COV_{imep} 값을 보여주고 있다. 지시평균유효압력을 각 사이클별로 측정하여 그 변화량을 나타낸 값을 의미하며 일반적으로 5% 이내의 운전조건에서는 연소안정성이 확보된다고 알려져 있다.⁽¹²⁾ 변경된 캠을 적용한 경우 각 연료의 희박한계인 λ=1.7과 λ=2.0에서 5% 이상의 값을 보이고 있다. 또한 천연가스에 비교하여 HCNG30을 사용할 경우 희박한 운전조건에서도 좀 더 안정적인 연소를 보이고 있다.

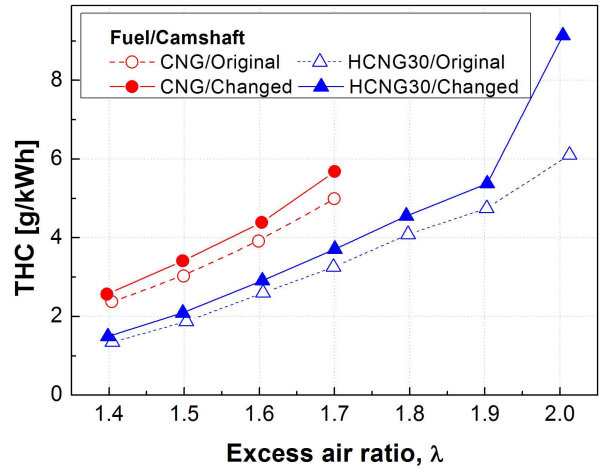


Fig. 4 THC emission in relation to air ratio using each camshaft

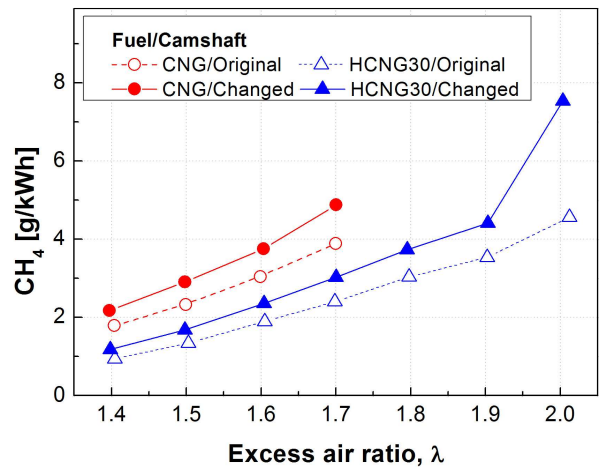


Fig. 5 CH₄ emission in relation to excess air ratio using each camshaft

Fig. 4는 탄화수소계 배출가스의 배출량을 보여주고 있다. 변경된 캠을 사용했을 경우 연소안정성 악화로 인하여 배출량이 증가한 것을 볼 수 있다. 천연가스는 운전가능한 모든 조건에서 평균 11.1% 배출량이 증가하였으며 HCNG30은 평균 12.1% 증가하였다. 모든 운전조건에서 HCNG30 연료가 좀 더 안정적인 연소안정성을 보이지만 증가폭은 약간 높은 경향을 보이고 있다. 일반적인 혼소의 경우 주로 흡입공기량을 변경하지 않은 상태에서 연료에 대한 영향을 파악하기 때문에 연료 주변 산소와의 반응에 의한 영향이 크게 나타난다. 그러나 본 연구에서는 일정한 공기과잉률을 유지하도록 연료 변경 시 각 연료의 이론공연비를 고려하여 적절한 흡입공기량을 제어하였으며, 가스연료의 경우 연료변화에 따른 Mixing 영향은 무시할 만하다. 즉 밸브오버

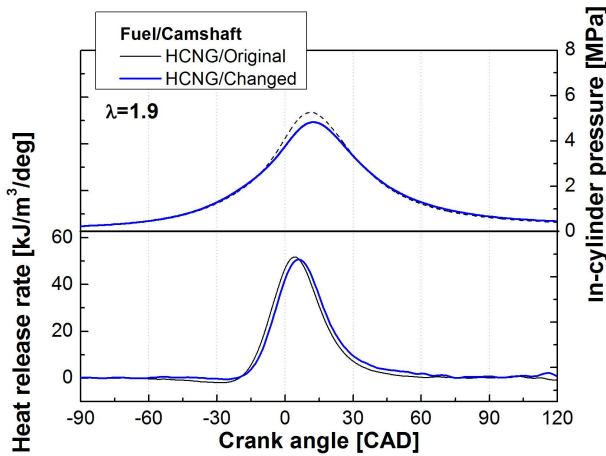


Fig. 6 Heat release rate and in-cylinder pressure in relation to crank angle using each camshaft

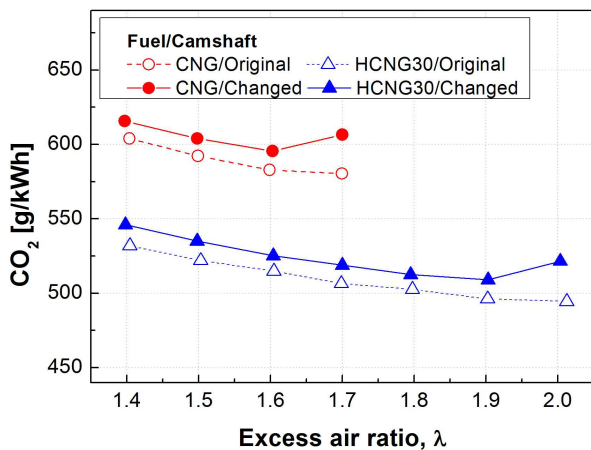


Fig. 7 CO₂ emission in relation to crank angle using each camshaft

랩의 변경에 의해 잔류가스량이 증가하더라도 연료의 반응성에 미치는 영향은 크지 않고, 희석효과에 의한 연소속도 감소의 경향이 지배적으로 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 5는 메탄의 배출량을 보여주고 있다. 변경캠을 사용했을 경우 천연가스는 평균 23.6%, HCNG30은 평균 24.7%의 증가폭을 보였다. 메탄의 배출량 증가폭이 탄화수소계 배출가스보다 크다는 것은 연소가 원활히 이루어지지 못하여 다시 배기가스로 배출되는 연료의 양이 증가되었음을 의미한다. 낮은 효율에 의해 증가된 연료공급의 원인으로 판단된다. 부분부하 운전조건에서는 과급압력이 상대적으로 낮다. 실린더로 공급되는 공기량에 비해 증가된 잔류가스는 연소에 필요한 공기량을 부족하게 만들어서 연료소비율을 악화시키고 배기가스에 악영향을 미칠 수 있다. 실험 결과에서 볼 수 있듯이 변경된 캠의 경우 기존

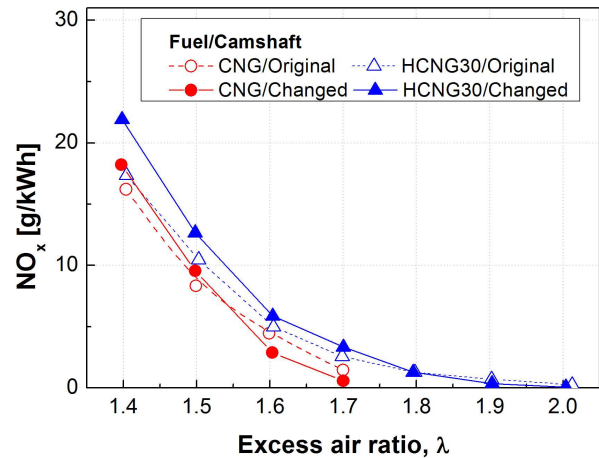


Fig. 8 NO_x emission in relation to crank angle using each camshaft

캠과 비교하여 모든 운전조건에서 부족한 공기량으로 인하여 공기과잉률을 유지하기 위해 과급압력이 소폭 증가했음을 확인할 수 있다. 결과적으로 체적효율 및 공기과잉률을 일정한 조건으로 유지하기 위해 연료량이 증가되었고, 메탄을 포함한 배출가스에 영향을 미친 것으로 보인다.

Fig. 6은 HCNG30 연료를 사용한 경우, 공기과잉률 1.9의 운전조건에서 각 캠축에 따른 실린더압력과 열방출률을 보여주고 있다. 모든 운전을 도시화 하였을 경우 분석이 어려우며, 각 조건을 비교하였을 때 경향이 비슷하며 천연가스를 사용했을 경우에도 같은 결과를 보이고 있다. 따라서 대표값으로서 최대 열효율을 보이며, 희박한계 조건에 해당하는 공기과잉률 1.9의 운전조건을 도시화 하였다. 변경된 캠을 적용했을 경우의 열방출률을 살펴보면 초기 연소속도가 상대적으로 감소한 것을 볼 수 있으며 최대값이 낮아지고 TDC를 지난 이후에 나타나는 것을 볼 수 있다. 상단에 도시한 실린더압력 역시 상대적으로 낮은 최대값을 보이고 있다. 이는 열효율이 감소하여 연료량이 증가하여도 연소가 원활히 이루어지지 못했다는 것을 보여주는 결과로 볼 수 있다.

Fig. 7은 이산화탄소 배출량을 보여주고 있으며 변경된 캠을 사용할 경우 배출량이 증가하는 경향을 보이고 있다. HCNG30 연료의 경우 천연가스에 비해 H/C 비율이 크고 상대적으로 열효율이 높기 때문에 낮은 배출량을 나타내었다. 앞서 서술한 바와 같이 부분부하 운전조건에서의 오버랩 감소는 열효율 감소를 초래하기 때문에 이산화탄소의 배출량이 증가한 것으로 판단된다. 캠축변경에 따른 증가폭을 살펴보면 천연가스는 평균

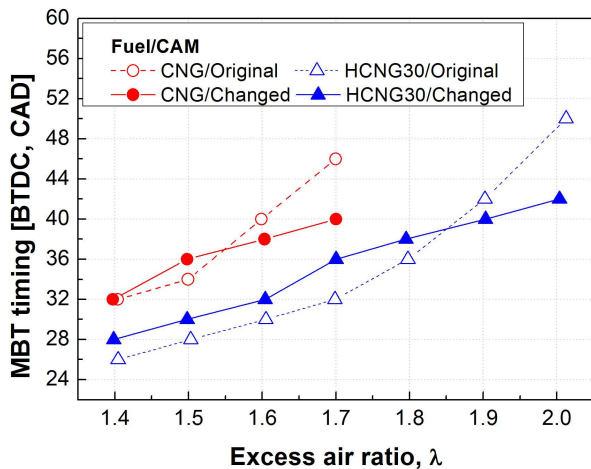


Fig. 9 MBT timing in relation to crank angle using each camshaft

2.0%, HCNG30은 평균 2.3%의 증가폭을 보이고 있다.

Fig. 8은 질소산화물 배출량을 보여주고 있다. HCNG30 연료를 사용했을 경우 동일한 공연비에서는 천연가스 대비 배출량이 많은걸 볼 수 있지만 희박연소 시 배출량이 극감하는 경향을 볼 수 있다. 밸브오버랩의 감소에 의한 영향을 살펴보면 상대적으로 농후한 운전조건에서는 증가하며 희박한 조건에서는 감소하는 경향을 보였다. 천연가스의 경우 $\lambda=1.5$, HCNG30은 $\lambda=1.8$ 까지는 배출량이 증가한 것을 볼 수 있지만 그 이상의 공기과잉률에서는 배출량이 감소하는 결과를 보였다.

이런 결과는 점화시기에 따른 영향으로 판단되며 Fig. 9와 같이 두 연료 모두 MBT 점화시기가 희박한 운전조건에서 지각된 것을 볼 수 있다. 변경된 캠을 적용했을 때 연소안정성이 악화되어 희박한게가 감소하였으며, $\lambda=1.9$ 에서 MBT 점화시기를 찾는 도중 실화가 발생하여 점화시기의 진각을 진행하기 어려웠다. 결과적으로 희박 운전조건에서 MBT 점화시기가 기존의 캠 대비 지각되었고 질소산화물 배출 감소에 영향을 미친 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 HCNG 엔진에서 밸브오버랩 감소 적용가능성을 검토하기 위해 부분부하 운전조건에서 연소 및 배기특성에 미치는 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 실린더 내 잔류가스의 영향으로 연소안정성

악화되어 열효율이 감소하였고 연료유량의 경우 천연가스는 3.1%, HCNG30 연료는 2.3% 증가하였으며 희박한게가 감소하였다.

(2) 열효율 감소로 인하여 이산화탄소 배출량이 증가하였으며 연소되지 못한 연료가 배기가스로 배출되어 메탄의 배출량이 상대적으로 큰 증가폭을 나타냈다. 질소산화물 배출량은 희박연소를 하면 MBT 점화시기가 지각되어 배출량이 감소하였다.

(3) 동일연료에서는 변경캠이 효율과 배기가스에 악영향을 미치지만 기존 캠의 천연가스(기존 엔진)와 변경된 캠의 HCNG30 연료의 경우를 비교하였을 때 동등한 탄화수소계 배출가스와 열효율 소폭 상승과 질소산화물 저감 효과를 나타냈다.

후 기

본 연구는 친환경자동차기술개발사업단의 "EURO-6 대응 시내버스용 수소-천연가스 혼합연료(HCNG) 엔진 개발" 과제 일환으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌 (References)

- (1) Jahirui, M. I., Masjuki, H. H., Saidur, R., Kalam, M. A., Jayed, M. H. and Wazed, M. A., 2001, "Comparative Engine Performance and Emission Analysis of CNG and Gasoline in a Retrofitted Car Engine," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, pp. 2219-2226.
- (2) Kim, C. U., Kim, C. G., Kim, S.S., Pang, H. S., Han, J. O. and Cho, Y. S., 1996, "A Study on the Performance Improvement for a Natural Gas Engine Under Lean Burn & WOT Condition," *Transaction of KSAE*, Vol. 4, No. 6, pp. 11~17.
- (3) Collier, K., Mulligan, N., Shin, D. and Brandon, S., 2005, "Emission Results from the New Development of A Dedicated Hydrogen - Enriched Natural Gas Heavy Duty Engine," SAE Technical Paper, 2005-01-0235.
- (4) Ma, F., Wang, Y., Liu, H., Li, Y., Wang, J. and Zhao, S., 2007, "Experimental Study on Thermal Efficiency and Emission Characteristics of a Lean Burn Hydrogen Enriched Natural Gas Engine,"

- International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, No. 18, pp. 5067~5075.
- (5) Ball, M. and Wietschel, M., 2009, "The Future of Hydrogen-opportunities and Challenges," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 615~627.
- (6) Shayegan, S., Hart, D., Pearson, P. and Joffe, D., 2006, "Analysis of the Cost of Hydrogen Infrastructure for Buses in London." *Journal of Power Sources*, Vol. 2, pp. 862~874.
- (7) Bysveen, M., 2007, "Engine Characteristics of Emissions and Performance using Mixture of Natural Gas and Hydrogen," *Energy*, Vol. 32, pp. 482~489.
- (8) Bauer, C. G. and Forest, T. W., 2001, "Effect of Hydrogen Addition on the Performance of Methan-Fuled Vehicle," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 26, pp. 55~70.
- (9) Park, C. W., Kim, C. G., Choi, Y., Won, S. Y. and Lee, S. Y., 2011, "A Study on the NO_x Emission Characteristics of HCNG Engine," *Transaction of KSAE*, Vol. 19, No. 4, pp. 78~83.
- (10) Wang, X., Zhang, H., Yao, B., Lei, Y., Sun, X., Wang, D. and Ge, Y., 2012, "Experimental Study on Factors Affecting Lean Combustion Limit of SI Engine Fueled with Compressed Natural Gas and Hydrogen Blends," *Energy*, Vol. 38, No. 1, pp. 58~65.
- (11) Park, C., Kim, C., Choi, Y., Won, S. and Moriyoshi, Y., 2011, "The Influence of Hydrogen on the Performance and Emission Characteristics of a Heavy Duty Natural Gas Engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 5, pp. 3739~3745.
- (12) Heywood, J. B., 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals," MCGraw-Hill