



HCNG 엔진의 터보차저 변경에 따른 전부하 출력 및 배출가스 특성 연구

†박철웅 · 김창기 · 임기훈* · 이성원 · 최영 · 이선엽
한국기계연구원, *과학기술연합대학원대학교 환경에너지기계공학과
(2013년 8월 2일 접수, 2013년 9월 27일 수정, 2013년 9월 27일 채택)

A Study on the Full Load Performance and Emission Characteristics with Turbo-charger Change in a HCNG Engine

†Cheolwoong Park · Changgi Kim · Gihun Lim*
Sungwon Lee · Young Choi · Sunyoup Lee

Korea Institute of Machinery and Materials, 104 Sinseongno Yuseong-gu Daejeon 305-343, Korea

**Dept. of Environment & Energy Mechanical Engineering, University of Science and Technology, 217 Gajungro Yuseong-gu Daejeon 305-350, Korea*

(Received August 2, 2013; Revised September 27, 2013; Accepted September 27, 2013)

요약

천연가스에 수소를 첨가하는 수소-천연가스 혼합연료(HCNG) 엔진 기술은 수소의 빠른 화염속도와 넓은 가연범위를 이용하여 출력 및 배기성능을 최적화하는 기술로서 희박연소 한계를 증가시킴으로써 열효율의 개선은 물론 유해배출물의 저감을 얻을 수 있다. 그러나 과급장치를 사용하는 희박연소 엔진의 경우 전부하 운전조건에서 희박연소 한계의 증가는 충분한 공기량을 공급할 수 있도록 과급용량의 증가가 선결되어야 구현될 수 있다. 본 연구에서는 HCNG 엔진 개발의 일환으로 과급시스템의 변경에 의한 엔진의 출력특성을 파악하고, 과급용량 증대의 적용가능성을 검토하고자 하였다. 터보차저가 과급압력의 증대 보다는 유량이 증가된 영역에서 효율이 높게 설계된 경우 농후한 혼합기 조건에서는 과급압력이 감소되더라도 채원상의 출력을 만족하며 효율적인 운전이 가능하였다.

Abstract - Hydrogen-natural gas blends(HCNG) engine is optimizing technology of performance and emission characteristics with use of hydrogen's fast flame speed and wide flammability limit. As lean-burn limit is extended, the improvement in thermal efficiency and harmful emissions can be achieved. However, the extension of lean-burn limit under a wide open throttle operation point could be realized with the increase in boosting capacity in a lean-burn engine with turbo-charging system. In the present study, the power output characteristics of HCNG engine with turbo-charger change is assessed and feasibility of the increase in boosting capacity is evaluated. The turbo-charger design with high efficiency at higher flow rate rather than higher boosting pressure makes efficient operation possible at relatively rich mixture condition.

Key words : HCNG, Turbo-charger, Full load, Torque, Effective area

†Corresponding author:cwpark@kimm.re.kr

Copyright © 2013 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

1970년대 오일쇼크 이후 대체에너지 차량 개발에 대한 관심으로 등장하게 된 천연가스 자동차는 도시 지역의 대기 환경 개선을 목표로 개발과 보급이 추진되었다. 특히 대도시의 노후 경유버스를 천연가스 버스로 교체하는 보급사업으로 대기질 개선에 기여하고 에너지원의 유효성을 확보하게 되었다. 그러나 2014년부터 시행 예정인 EURO-6 배기 규제는 질소산화물(NOx) 배출허용기준이 현재의 배기 규제인 EURO-5의 20% 수준으로 강화되기 때문에, 희박연소를 이용하는 천연가스 엔진의 경우 디젤엔진과 같이 고가의 De-NOx 촉매를 장착해야 한다.

고가의 촉매 장착은 기존의 천연가스 엔진이 가지고 있던 저공해성이나 가격경쟁력 등의 장점을 상당부분 사라지게 만들기 때문에 충전 인프라가 불리한 천연가스 엔진의 위상 및 보급 타당성은 낮아지게 된다. 이를 대응하기 위한 방안으로 천연가스에 수소를 첨가하여 희박연소 한계를 증가시킴으로써 열효율의 개선은 물론 유해배출물의 저감을 얻을 수 있는 수소-천연가스 혼합연료(HCNG) 엔진 기술이 주목받고 있다.

HCNG 엔진 기술은 수소의 빠른 화염속도와 넓은 가연범위를 이용하여 출력 및 배기성능을 최적화하는 기술로서 이전의 연구결과에 의하면 수소의 혼합 비율에 따라 연소특성이 달라진다[1,2]. Collier[3-5] 등의 연구결과에 따르면 수소혼합률이 30% 이상의 조건에서 희박연소를 통하여 NOx 배출량이 0.1 g/kWh 이하로 만족됨을 확인할 수 있다. 연비향상과 대표적인 온실가스인 이산화탄소 배출 저감 성능은 HCNG 엔진의 또 다른 장점이다[6,7].

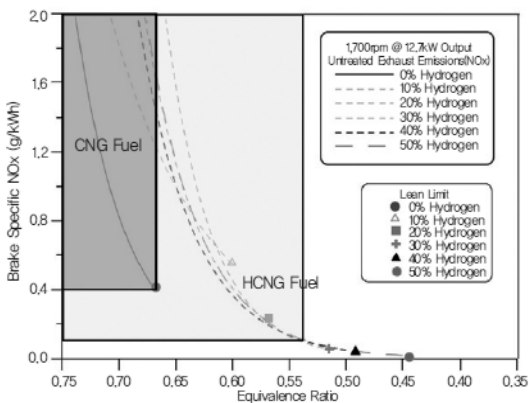


Fig. 1. NOx versus equivalence ratio for varying hydrogen content in natural gas. (SAE 2005-01-0235)

그러나 과급장치를 사용하는 희박연소 엔진의 경우 전부하 운전조건에서 희박연소 한계의 증가는 충분한 공기량을 공급할 수 있도록 과급용량의 증가가 선행되어야 구현될 수 있다[8]. 일반적으로 배기에너지를 이용하는 과급시스템에서 과급용량의 증대는 배기압력의 증가 또는 토크 변동과 같은 엔진의 성능에 영향을 미치게 된다.

이에 본 연구에서는 HCNG 엔진 개발의 일환으로 과급시스템의 변경에 의한 엔진의 출력특성을 파악하고, 과급용량 증대의 적용가능성을 검토하고자 하였다.

II. 실험장치 및 실험방법

2.1. 실험장치

본 연구에서는 대형 천연가스 엔진에서 운전영역에 따른 수소첨가의 영향을 검토하기 위해서 11L급 6기통 천연가스 엔진을 설치하여 기본적인 성능실험을 수행하였다. Fig. 2과 Fig. 3에 각각 엔진을 포함한 시험장치의 전체적인 구성과 사진을 나타내었으며, 천연가스 엔진의 제원은 Table 1과 같다. 기존의 희박연소 엔진을 기반으로 하여 고압천연가스 및 수소 공급·제어시스템을 설치하였다.

주연료인 천연가스는 실제 엔진에서 사용되는 연료공급시스템을 사용하여, 20 MPa 정도로 충전된 고압연료용기로부터 레귤레이터에서 0.8 MPa로 감압된 연료가 Metering valve 및 Mixer를 통하여 흡기매니폴드로 공급되도록 하였다. 이때 연료량은 가스분사기 8개가 하나의 모듈을 구성하는 Metering valve에 의해 제어되었으며, 레귤레이터에서 감압된 연료의 팽창에 의한 냉각을 막기 위해 열교환기를 장착하였다. 수소연료는 12 MPa로 충전된 여러 개의 고압수소

Table 1. Specification of base natural gas engine

Type	Description
Number of cylinder	6
Bore (mm)	123
Stroke (mm)	155
Displacement volume (cc)	11,050
Compression ratio	10.5
Max. power	213 kW / ,2,200 rpm
Max. Torque	1,150 N·m / 1,260 rpm

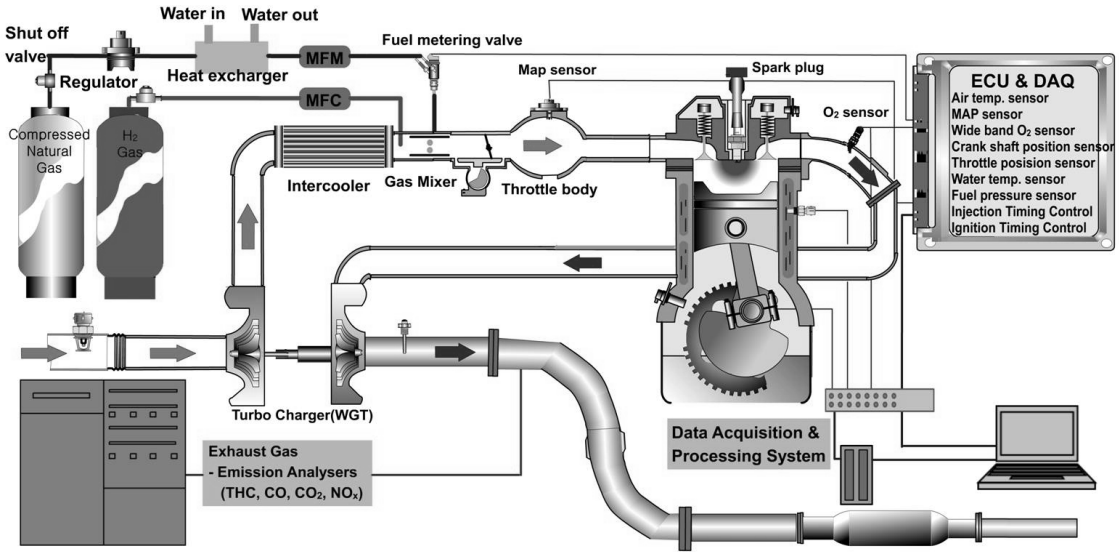


Fig. 2. Schematic of experimental setup.

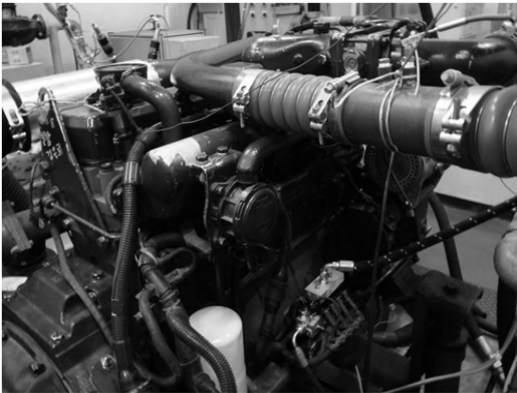


Fig. 3. Photo of test engine and experimental setup.

가스용기를 병렬로 연결하고 압력조정기를 이용하여 0.8 MPa의 압력으로 감압한 후 MFC(Mass flow controller)로 전해진 뒤, 믹서 전단에서 공급하여 흡입공기와 섞인 후 흡기 매니폴드로 공급되도록 하였다.

전부하 출력성능 향상을 위한 터보차저의 개발 시제품의 적용을 위해 기존 터보차저의 흡배기 시스템과 윤활 및 냉각 유로에 대응할 수 있는 부품을 가공하여 개발품을 대체/장착하여 성능을 비교하였다. Fig. 4은 엔진에 장착되어 있는 현 양산 터보차저와 개발 시제품의 특성 곡선을 비교하여 나타낸 것으로, 개발 시제품

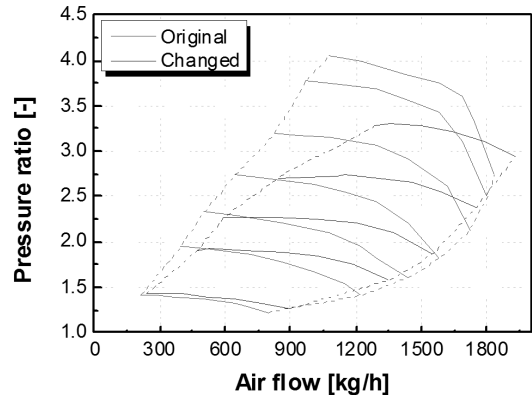


Fig. 4. Comparison of flow characteristics for original and modified turbo-charger.

의 경우 토출압력은 약간 감소되지만 유량이 증가되는 쪽으로 Effective area가 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다.

천연가스의 유량측정은 MFM(Mass flow meter)를 이용하였고, 수소유량은 MFC를 이용하여 직접 제어하였다. 컴퓨터에 의해 제어되는 EMS(Engine management system)을 이용해 천연가스 연료의 분사량과 분사시기 및 점화시기를 임의로 조절이 가능하도록 하였다. 엔진의 회전수 및 부하는 와전류식 동력계를 이용하여 제어하였고, 엔진의 회전수 및 스톱을 개도 등

엔진 제어변수를 모니터링하였다. 공연비 측정은 LA 4 lambda meter(ETAS Co.)를 이용하였다.

2.2 실험방법

본 연구의 대상이 되는 차량은 대형버스차량으로서, 시험 시 운전조건은 터보차저의 과급 성능 및 전부하 출력 성능 만족 여부를 검토하기 위해 최대토크 운전 조건인 1,260 rpm / 1,150 Nm 조건과 정격 출력 운전 조건 (2,100 rpm / 970 Nm)의 2가지의 운전영역으로 설정하고 공기과잉율의 변화에 따른 성능실험을 수행하였다.

엔진이 충분히 Warm-up 된 상태에서 냉각수 온도가 $82.5 \pm 2.5^\circ\text{C}$ 에서 유지되도록 냉각수온 조절 시스템을 설정하고, 전 실험영역에서 과급압력을 제어하여 공연비 변화 실험을 진행하였다. 각각의 운전영역에서 점화시기는 최대효율을 나타내는 최적점화시기인 MBT(minimum advance for best torque) 점화시기에서 운전되도록 하며 출력 특성을 검토하였다. 엔진에 공급되는 연료는 기존의 천연가스 연료와 수소가 체적비율로 30% 혼합된 연료를 사용하여 각각을 비교하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

3.1 회전수 별 전부하 출력 특성

Fig. 5와 Fig. 6은 최대 토크 운전조건인 1,260 rpm, 전부하 운전조건에서 터보차저-개발품을 이용하여 실험한 과급압력 및 토크 결과를 현양산품을 이용하여 얻은 결과와 비교한 것이다. 상대적으로 농후한 혼

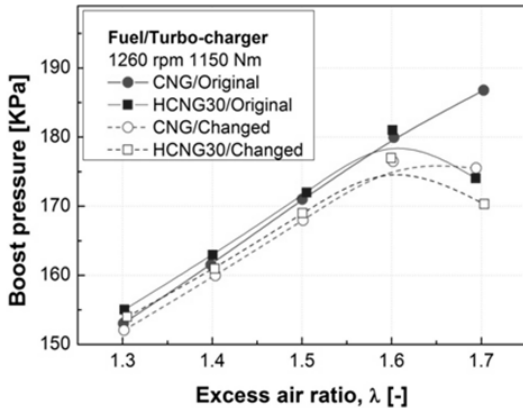


Fig. 5. Boost pressure versus excess air ratio with CNG and HCNG fueled at MBT spark timing of 1,260 rpm, wide open throttle condition.

합기 조건에서의 과급압력의 차이는 거의 없으나, 혼합기가 희박해질수록 현양산품에 비해 낮은 수준의 과급압력을 토출하였다. 상대적으로 농후한 혼합기 조건에서 낮은 과급압력은 연료소모율의 감소를 의미하고 이는 효율적인 운전에 의한 결과이기 때문에 희박한 혼합기 조건에서의 토크 향상을 기대하였으나, 현양산품과 비슷하거나 오히려 낮은 수준을 나타내었다. 이는 Fig. 4에 나타난 것과 같이 개발품의 특성이 일정한 유량 조건에서 압력비가 증가될 경우 효율이 감소하여 역류한계에 가까워지기 때문에 높은 과급압력

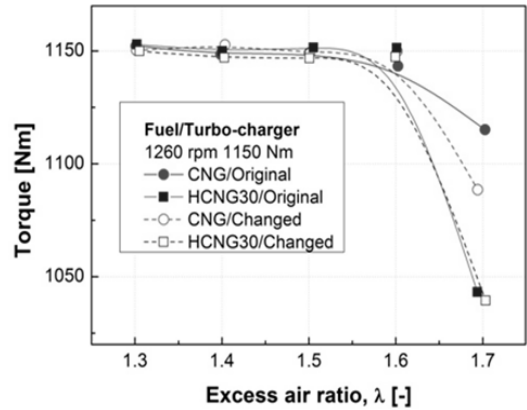


Fig. 6. Torque versus excess air ratio with CNG and HCNG fueled at MBT spark timing of 1,260 rpm, wide open throttle condition.

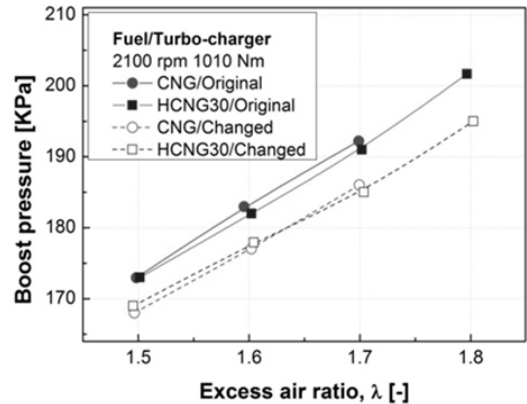


Fig. 7. Boost pressure versus excess air ratio with CNG and HCNG fueled at MBT spark timing of 2,100 rpm, wide open throttle condition.

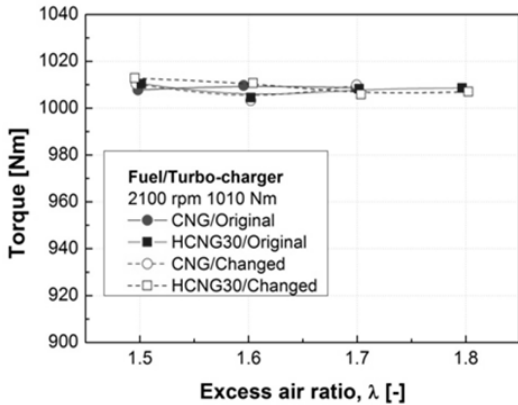


Fig. 8. Torque versus excess air ratio with CNG and HCNG fueled at MBT spark timing of 2,100 rpm, wide open throttle condition.

이 요구되는 희박한계 조건에서의 과급효율이 감소한 것이 원인으로 파악된다.

정격출력 조건에서의 과급압력과 토크결과를 각각 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 최대 토크 운전조건과 비슷하게 개발품의 경우가 현양산품에 비해 낮은 과급압력을 나타내었고 그 차이가 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다. 고속조건에서 배기유량 증가에 의해 배기에너지가 증가되기 때문에 희박한 혼합기 조건에서도 제원상의 출력을 만족하였다.

3.2 회전수 별 배출가스 특성

Fig. 9와 Fig. 10은 최대 토크 운전조건인 1,260 rpm, 전부하 운전조건에서 NOx 및 HC 배출특성을 비교한 것이다. 터보차저-개발품의 경우 효율이 높지만 동일한 출력 조건에서의 효율 악화는 흡입공기 및 공급연료량의 증가를 의미하기 때문에 현양산품에서의 NOx의 배출이 증가할 것으로 예상되었으나 오히려 감소하였다. 이는 효율이 좋지 않은 현양산품의 경우 제원상의 출력을 만족하기 위해 보다 높은 과급압력이 요구되고 이를 위해서는 배압이 증가되었기 때문에 나타나는 결과로 판단된다. 터보차저에서 과급압력을 증가시키기 위해서는 웨스트게이트의 개도를 감소시켜 터빈을 통과하는 배기 유량을 증가시켜야 하고 이로 인해 증가된 배기압력은 연소실내의 잔류가스를 증가시키는 원인으로 작용한다. 잔류가스의 증가로 연소실내에서 혼합기의 희석효과로 인해 NOx의 배출을 감소시키는 결과를 나타낸다.

이에 반해 HC 배출의 경우 잔류가스의 증가에 대한 영향이 작기 때문에 효율악화에 의한 공급연료량의 증가가 현양산품에서의 HC 배출을 증가시킨 원인으로

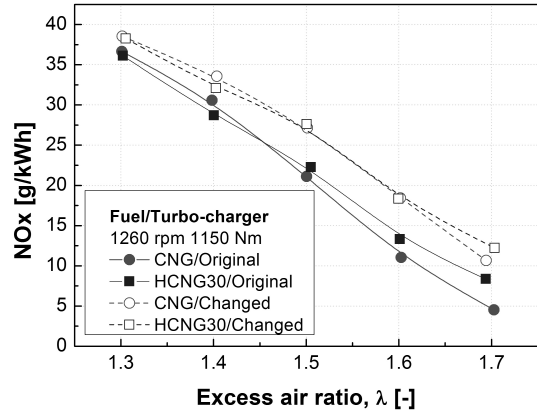


Fig. 9. NOx emissions versus excess air ratio with CNG and HCNG fueled at MBT spark timing of 1,260 rpm, wide open throttle condition.

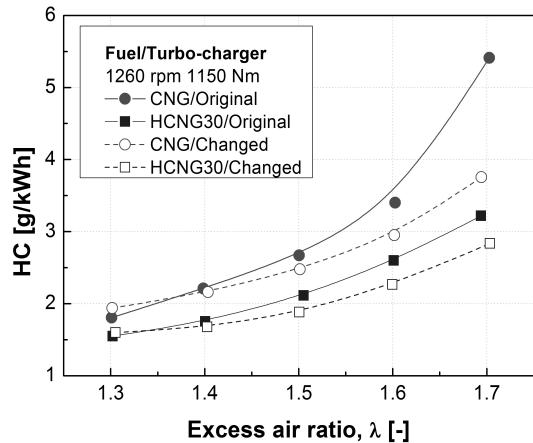


Fig. 10. HC emissions versus excess air ratio with CNG and HCNG fueled at MBT spark timing of 1,260 rpm, wide open throttle condition.

로 판단된다. 각 연료별 MBT 점화시기에서의 NOx 배출은 큰 차이가 없으나 수소첨가에 의해 천연가스의 양이 감소된 HCNG 연료의 경우 HC의 배출이 감소되었다.

정격출력 조건에서의 NOx 및 HC 배출특성을 각각 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 터보차저-개발품 적용시 배기압력의 감소에 의한 NOx 배출 증가 및 HC 배출 감소의 경향은 최대 토크 운전 조건에서와 동일하게 나타났다. 최대 토크 운전 조건에서 출력을 만족하

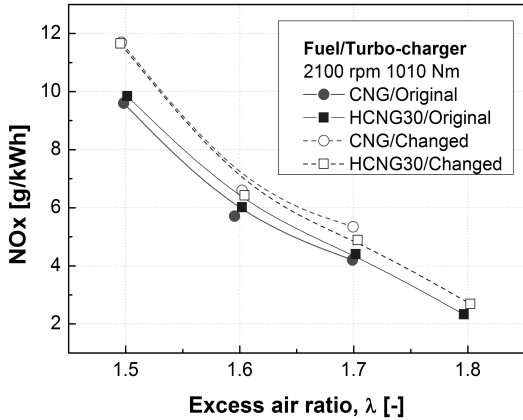


Fig. 11. NOx emissions versus excess air ratio with CNG and HCNG fueled at MBT spark timing of 2,100 rpm, wide open throttle condition.

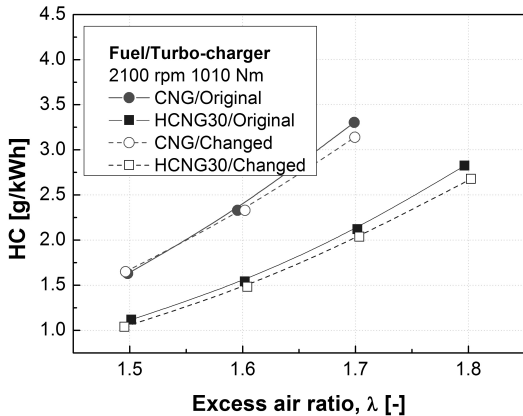


Fig. 12. HC emissions versus excess air ratio with CNG and HCNG fueled at MBT spark timing of 2,100 rpm, wide open throttle condition.

는 공기과잉율 1.6 조건을 기준으로 검토할 때 HC 배출의 감소는 고무적인 반면 높은 수준의 NOx 값은 후처리장치를 장착하더라도 배출가스 규제치를 만족하기에는 어려운 수준이다. 그러나 정격출력 조건에서는 공기과잉율 1.7 조건에서도 연료의 종류에 관계없이 제원상의 출력을 만족하고 있으며, HCNG의 경우 EURO-V 수준의 배출가스 규제치(2.0 g/kWh)에 근접한 값을 보이고 있다. 공기과잉율의 증가에 따른 HC 배출의 증가는 산화촉매의 귀금속 증량을 위한 비용

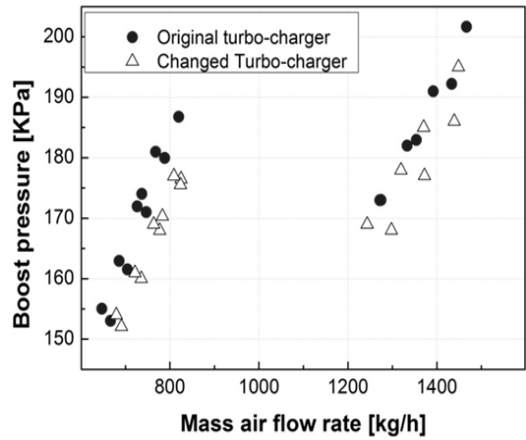


Fig. 13. Boost pressure versus mass air flow rate for each operation point.

증가를 초래할 수 있기 때문에 운전조건 별 운전제어 변수의 최적화가 필요할 것으로 예상된다.

3.3. 터보차저 변경 타당성 검토

Fig. 13은 각 운전조건에서의 공기유량에 따른 흡기 매니폴드 압력 변화 및 성능을 나타낸 그래프이다. 제원상의 특성에 맞는 결과를 확인할 수 있으며, 상대적으로 하단의 Effective area에 해당하는 것으로 판단된다.

개발품이 양산품에 비해 과급압력의 증대 보다는 유량이 증가된 영역에서 효율이 높게 설계되어 있기 때문에 상대적으로 농후한 혼합기 조건에서는 과급압력이 감소되더라도 제원상의 출력을 만족하며 효율적인 운전이 가능하였다. 그러나 개선을 목표로 하였던 최대토크 운전 조건에서의 출력성능은 높은 과급압력이 요구되어 달성이 불가능하였다. 본 실험에 적용된 개발품으로는 희박연소 한계 조건에서 현양산품에 비해 압축된 공기가 불안정해지고 역류할 가능성이 높은 것으로 판단된다. 따라서 최대토크 운전 조건에서 제원상의 출력을 만족하며 희박영역을 확장하기 위해서는 보다 높은 과급압력 특성을 가지는 터보차저의 적용과 함께 배기에너지를 확보하기 위한 엔진의 적절한 운전이 요구될 것이다.

IV. 결론

본 연구에서는 HCNG 엔진에서 희박영역 확장을 위해 터보차저를 변경하여 최대 토크 운전조건 및 정격 출력 조건에서의 성능을 현양산품의 결과와 비교하여 적용 타당성을 검토하였다.

(1) 터보차저가 과급압력의 증대 보다는 유량이 증가된 영역에서 효율이 높게 설계된 경우 농후한 혼합기 조건에서는 과급압력이 감소되더라도 제원상의 출력을 만족하며 효율적인 운전이 가능하였다.

(2) 희박연소 한계 조건에서는 압축된 공기가 불안정해지고 역류할 가능성이 높기 때문에 최대토크 운전 조건에서 제원상의 출력을 만족하지 못하였다.

(3) 상대적으로 고속 운전조건인 정격출력 조건에서 배기유량 증가에 의해 배기에너지가 증가되기 때문에 희박한 혼합기 조건에서도 제원상의 출력을 만족하였다.

감사의 글

본 연구는 환경부 친환경자동차기술개발사업단(글로벌탑 환경기술개발사업, 2011년~2016년)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] C. Park, C. Kim, Y. Choi, S. Won, "A study on lean combustion characteristics with hydrogen addition in a heavy duty natural gas engine", Journal of Korean Institute of Gas, Vol. 14, No. 4, 12-17, 2010.
- [2] C. Park, C. Kim, Y. Choi, S. Won, Y. Moriyoshi, "The influences of hydrogen on the performance and emission characteristics of a heavy duty natural gas engine", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, No. 5, 3739-3745, 2011.
- [3] K. Collier, N. Mulligan, D. Shin and S. Brandon, "Emission results from the new development of a dedicated hydrogen - enriched natural gas heavy duty engine", SAE 2005-01-0235, 2005.
- [4] S. Munshi, C. Nedelcu, J. Harris, T. Edwards, J. Williams, F. Lynch, M. Frailey, G. Dixon, S. Wayne and R. Nine, "Hydrogen-blended natural gas operation of a heavy-duty turbocharged lean-burn spark ignition engine", SAE 2004-01-29561 2004.
- [5] M. Fanfua, W. Yu, L. Haiquan, L. Yong, W. Junjun and Z. Shuli, "Experimental study on thermal efficiency emission characteristics of a lean burn hydrogen enriched natural gas engine", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, 5067-7075, 2006.
- [6] A. S. Orhan, D. Zafer, K. Nafiz and V. T. Nejat, "Internal combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixutre", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 29, 1527-1539, 2004.
- [7] S. Thipse, D. Rairikar, P. Kavathekar and P. Chitnis, "Development of a six cylinder HCNG engine using an optimized lean burn concept", SAE 2009-26-031, 2009.
- [8] C. Park, C. Kim, Y. Choi, "Power output characteristics of hydrogen-natural gas blend fuel engine at different compression ratios", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 37, No. 10, 8681-8687, 2012.