

Off-road 엔진에서 WGT와 VGT장착에 따른 효율 및 특성 비교

신재식^{**} · 강정호^{*} · 하형수^{*} · 정학섭^{**} · 표수강^{**}

^{*}자동차부품연구원 배기연비성능연구센터 · ^{**}국제종합기계

Compare Efficiency and Characteristics according to the WGT and VGT Application on the Off-road Engines

Jaesik Shin^{**}, Jungho kang^{*}, Hyeongsoo Ha^{*}, Haksup Jung^{**} and Sukang Pyo^{**}

^{*}Korea Automotive Technology Institute

^{**}Department of R&D center, Kukje Machinery Company

(Received 3 March 2016, Received in revised form 10 August 2016, Accepted 31 August 2016)

ABSTRACT

The aim of this study is to compare the effectiveness of turbo chargers on engines for off-road use when combined with WGT and VGT technologies. The effectiveness of turbo chargers was measured and performance was compared using a functional model. Exhaust characteristics were compared using WGT and VGT technologies through a gas analyzer. Results showed VGT technology was more effective at high RPM compared to WGT technology. When it came to maximising turbo performance, VGT was more effective than WGT in every test. WGT and VGT produced similar exhaust NOx levels, whereas the VGT was more effective on the PM.

Key Words : Off-road engine, Waste gate turbocharger, Variable geometry turbocharger, Turbine efficiency

기 호 설 명

VGT : Variable Geometry Turbocharger
WGT : Waste Gate Turbocharger
DPF : Diesel Particulate Filter
CRDI : Common Rail Direct Injection
BSFC : Brake Specific Fuel Consumption

$\eta_{c, is}$: compressor isentropic efficiency
T : Temperature
p : pressure
k : specific heat ratio
 \dot{m} : inlet mass flow rate
 P_c : compressor power

1. 서론

자동차 등 수송 분야에서 배출되는 CO₂는 국내의 경우 전체배출량의 20% 이상을 차지하므로 가솔린 엔진 대비 CO₂가 적은 디젤 차량의 보급이 많이 이루어지고 있다. 승용디젤엔진의 소형화 및 고속화에 따라 커먼레일과 고압분사 장치 같은 새로운 연료

분사 기술과 배기규제와 연비향상에 대응하기 위해 새로운 기술들이 적용되고 있다. 특히, 승용디젤엔진이나 상용디젤엔진보다는 늦었지만, off-road용 엔진에서도 Tier-4규제가 적용되었으며, 규제를 만족시키기 위해서 터보차저, EGR, CRDI와 같은 전처리 기술의 적용과 DPF와 DeNOx시스템과 같은 후처리 기술의 적용이 불가피 하다.

이 중 터보차저는 내연기관에서 발생하는 배기가스를 이용해 터빈을 고속 회전시켜, 그 회전력으로 원심식 압축기를 구동하여 압축한 공기를 엔진 내부로 보낸다. 이런 결과로 인해 흡입공기량의 증가에 따라 연소실에 있는 연료가 완전 연소 될 수 있도록 하여 엔진출력을 높인다[1-3].

† Corresponding Author, jsshin@katech.re.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

엔진에 적용되는 터보차저 기술은 크게 VGT (variable geometry turbocharger) 기술과 WGT (waste gate turbocharger) 기술로 나눌 수 있는데 현재 대부분의 off-road용 엔진에서는 WGT 기술을 적용하고 있다. WGT 기술은 배기유량이 많아져 압축기의 과급압력이 일정압력 이상 올라갈 경우에 배기가스의 일부를 bypass 시켜 터빈으로 공급되는 유량을 차단함으로써 터빈의 과회전 및 펌핑손실(pumping loss) 증가를 막는다. 그러나 초기 엔진 구동 및 저부하 영역에서 엔진에서 배출되는 배기가스 에너지가 부족하여 과급기의 작동이 원활하지 못하다. 반면 VGT는 VGT vane 각도를 조절함으로써 터빈에 공급되는 배기가스의 유동특성을 변화시켜 다양한 엔진운전영역에서의 과급 압력을 조절 할 수 있는 장점이 있어 off-road용 엔진에서도 VGT 기술을 적용하기 위하여 개발이 이루어지고 있다[4-8].

본 연구에서는 3,600 cc CRDI off-road용 엔진에 WGT와 VGT 기술을 각각 적용하여 과급기 성능 검토를 위한 시험장치의 구성과 관계식을 이용하여 과급기의 효율계산 및 각 기술의 배출가스 특성에 대해 비교하였다.

2. 실험장치 및 실험조건

2.1. 실험장치

2.1.1. 실험엔진 및 분석 장치

Fig. 1은 본 연구의 실험 장치에 대한 개략이며 엔진, 동력계, 압력, 온도센서, 배기가스분석기, smoke meter 등으로 구성하였다. 본 연구에 사용된 실험용

Table 1. Engine specification

Description	Specification
Cylinder [-]	4
Displacement [cc]	3,621
Bore [mm]	98
Stroke [mm]	120
Type of fuel injection	CRDI

엔진은 EGR system, 과급장치가 적용된 배기량 3,600 cc off-road용 CRDI 엔진으로 자세한 제원은 Table 1에 나타내었다. 엔진동력계는 AVL사의 240 kW급 엔진동력계를 사용하였고, 배기가스 분석계는 Horiba사의 MEXA-9100DEGR을 사용하였으며, 광투과식 매연 측정기(Opacimeter, AVL)를 이용하여 매연측정을 하였다.

2.2. 실험영역

Off-road용 엔진에서 엔진운전영역의 변화에 따라 WGT와 VGT의 효율 및 배기가스 특성을 비교하기 위해 엔진회전수 1000 RPM~2600 RPM, 부하는 0~fullload까지 엔진운전영역을 변화시켜가며 시험을 진행하였고, VGT 시험에서 vain개도량의 경우 연료 소모량 및 배출가스의 특성이 전체적으로 양호한 영역인 개도량 50%에 고정하여 실험을 진행하였다. 실험 진행 중 실내온도는 $25 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 유지하였으며, 냉각수 온도는 80°C , 연료 본 실험에서 지정한 변수 외에는 모든 조건들은 고정하였으며 실험 영역에 대한 자세한 내용은 Fig. 2에 나타내었다.

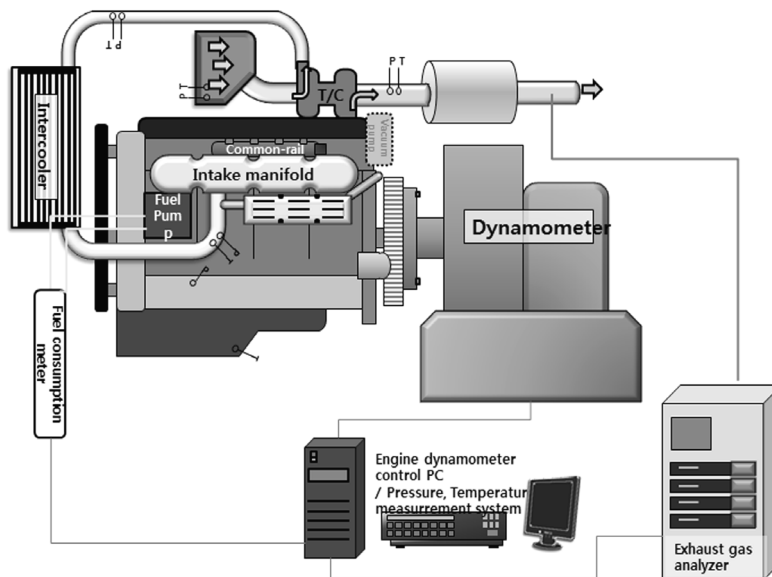


Fig. 1. Experiment schematic diagram systems.

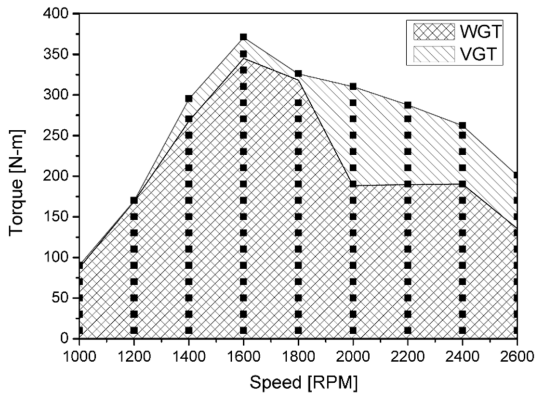


Fig. 2. Experimental conditions according to engine speed and torque.

2.3. 터보차저

WGT시스템의 웨스트게이트 밸브는 터보차저의 과급압이 일정압력 이상으로 상승시 터보차저 내부의 손상등을 방지하기 위하여 배기가스를 바이패스시키는 기능을 한다. Fig. 3에서처럼 과급압 과대시 일부 과급압이 웨스트게이트 밸브를 밀게되고 그와 연동된 배기 바이패스 밸브도 밀리면서 배기가스의 일부가 터빈을 경유하지 않고 배출되어 과급압을 감소시키게 된다. Fig. 4는 VGT vane을 도시한 그림이다. VGT 시스템은 터빈, 컴프레서, 전자제어식 VGT vane 액츄에이터로 구성되어 있으며, vane 개도량 조절을 통해 흡기의 과급압력을 제어하는 역할을 한다.

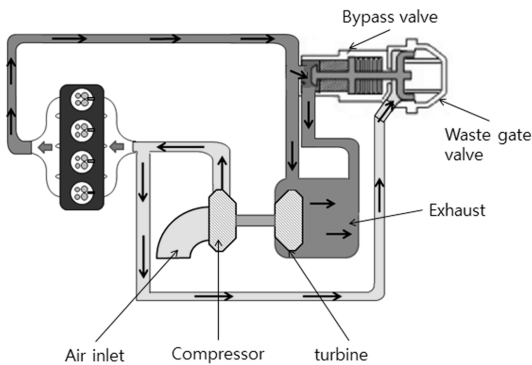


Fig. 3. schematic diagram of waste gate turbocharger.

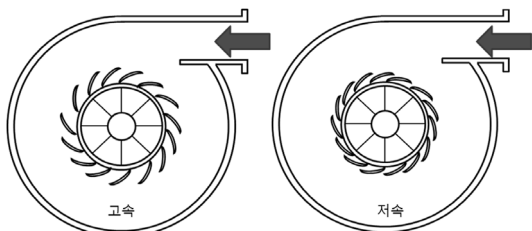


Fig. 4. Definition of VGT vane and schematic diagram.

3. 터빈 성능 비교 결과

3.1. 과급기 효율 성능 비교

압축기의 유동성능은 압축비(P_{out} / P_{in})로 나타낼 수 있으며, 압축기의 효율 성능을 나타내기 위해서 터빈을 지나가는 유동은 등엔트로피 과정을 거친다고 가정하였다. 그러나 실제적으로는 압축기를 통과할 시 엔탈피의 손실로 인하여 완전한 등엔트로피 과정이 되지 못한다. 따라서 과급기의 등엔트로피 효율식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$\eta_{c, is} = \frac{\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\frac{T_{out}}{T_{in}} - 1} \tag{1}$$

터빈 효율의 경우 터빈 등엔트로피 효율은 터빈하우징의 열손실로 인하여 많은 오차를 수반하는 경우가 있어, 대부분은 터빈전효율(turbine overall efficiency)을 특성결과로 나타낸다.

터빈 전효율은 터빈 등엔트로피 출력에 대한 압축기 출력의 비를 나타내며, 압축기 출력 식 (2)에 나타내었으며, 터빈 등엔트로피 출력은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 그리고 식 (4)에 터빈 전효율(η_t)에 대해 정의하였다.

$$P_c = \dot{m}_c C_p T_{in} \frac{1}{\eta_{c, is}} \left\{ \left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right\} \tag{2}$$

$$P_{t, is} = \dot{m}_t C_p T_{in} \left(1 - \left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right) \tag{3}$$

$$\eta_t = \frac{P_c}{P_{t, is}} \tag{4}$$

Fig. 5는 실험영역에서 각 RPM별 최대 출력 지점에서 과급기의 등엔트로피 효율을 비교한 그래프이며, 비교결과 WGT의 경우 낮은 엔진 RPM영역에서 VGT를 적용했을 때보다 효율이 높았으나, 1600 RPM 이상 영역에서는 VGT의 등엔트로피 효율이 높은 것으로 확인되었다. 이는 배기유량이 많아지면 WGT기술의 경우 터빈의 과회전 및 펌핑손실 증가를 막기 위해 배기가스의 일부를 bypass 시켜 VGT기술에 비해 고회전 영역에서 효율이 낮은 것으로 판단된다.

Fig. 6은 1600 RPM에서 WGT와 VGT적용에 따른 터빈 등엔트로피 출력에 대한 압축기 출력을 나타낸 그래프이다. 터빈등엔트로피 출력에 대한 압축기 출

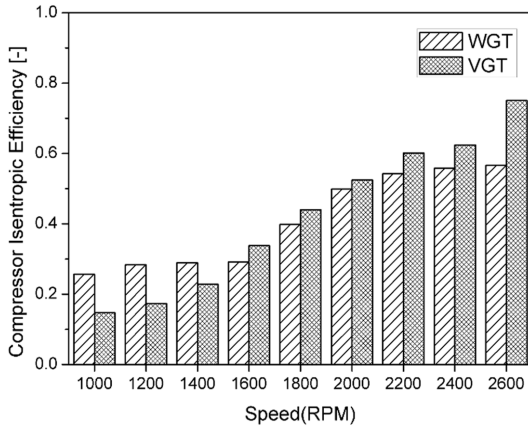


Fig. 5. Comparison of the compressor efficiency according to the WGT and VGT application.

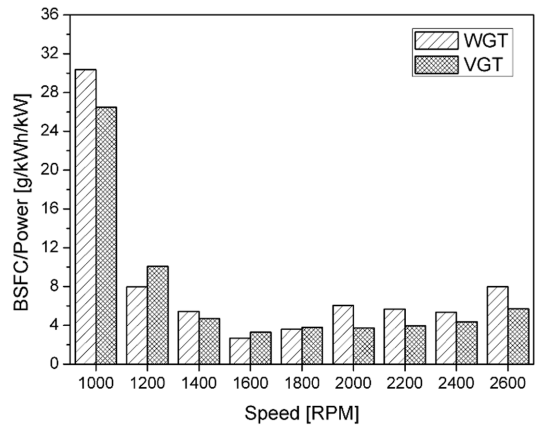


Fig. 7. Comparison of the BSFC/power according to the WGT and VGT application.

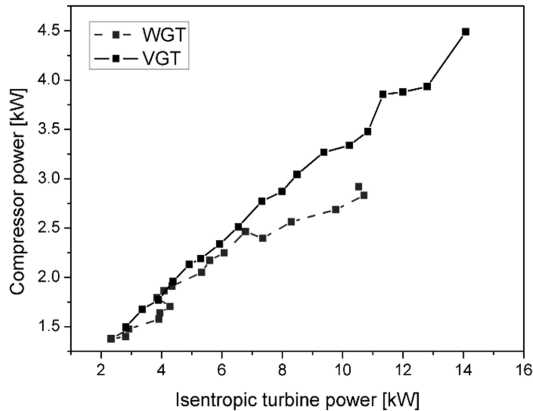


Fig. 6. Comparison of compressor power verse isentropic turbine power in WGT and VGT.

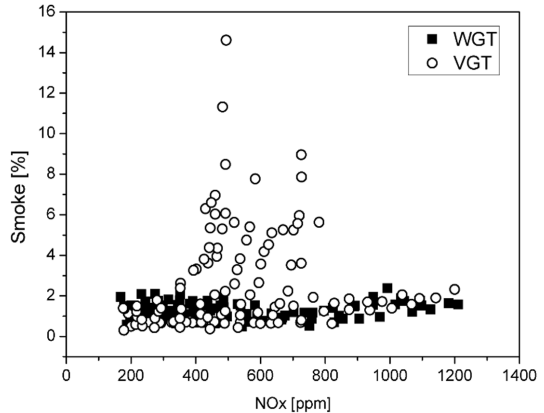


Fig. 8. Comparison of the NOx and Smoke according to the WGT and VGT application.

력은 일반적으로 선형관계를 가지며, 계산결과 같은 RPM조건일 때, 모든 영역에서 VGT가 WGT에 비해 높게 나타났다.

3.2 엔진 및 배출가스 특성 비교

Fig. 7은 실험영역에서 각 RPM별 최대 출력 지점에서 WGT와 VGT적용에 따른 출력에 대한 BSFC의 비교를 나타낸 그래프이다. 그래프의 y축은 낮을수록 출력에 대한 연비가 낮은 것을 의미하며, 고 회전 영역으로 갈수록 VGT가 WGT에 비해 연료소모량 측면에서 향상되는 것을 알 수 있었다.

Fig. 8은 WGT와 VGT적용에 따른 NOx와 PM의 배출가스 특성을 나타냈으며, 실험결과 NOx의 배출량은 전체적으로 비슷한 경향이 나타났으나, PM의 경우 VGT적용을 했을 때 더 높게 나타나는 경향을 보인다. 이는 off-road용 CRDI엔진에서 EGR 및 VGT vane 조정 없이 VGT와 WGT의 교체에 따른 특성을

비교하여 나타난 결과이며, EGR rate 및 VGT vane 최적화 시 PM의 양을 줄일 수 있다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 3,600 cc CRDI off-road용 엔진에 WGT와 VGT기술을 각각 적용하여 과급기 성능 검토를 위한 시험장치의 구성과 관계식을 이용하여 과급기의 효율계산 및 각 기술의 배출가스 특성에 대해 비교하였으며, 본 연구에서 도출한 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) WGT와 VGT적용에 따른 터빈효율을 제시하기 위하여 압축비 및 엔트로피 효율식을 이용하였으며, 그 결과 WGT의 경우 낮은 엔진 RPM영역에서 VGT를 적용했을 때보다 효율이 높았으나, 1600 RPM 이상 영역에서는 VGT의 등엔트로피 효율이 높은 것으로 확인되었다.

2) 동 RPM에서 엔진 부하에 따라 터빈의 등엔트로피 출력을 비교한 결과 모든 영역에서 VGT가 WGT에 비해 등엔트로피 출력이 높게 나타났다.

3) RPM별 전 부하 영역에서 WGT와 VGT적용에 따른 연료소모량을 비교한 결과 고 RPM 영역으로 갈수록 VGT가 연료소모량이 더 낮게 측정되었다.

4) 실험 전체 영역에서 WGT와 VGT적용에 따른 NOx와 PM의 배출가스 특성을 비교하였으며, 비교 결과 NOx의 배출량은 전체적으로 비슷한 경향이 나타났으나, PM의 경우 VGT적용을 했을 때 더 높게 나오는 경향을 보인다. 이는 EGR 및 VGT vane 조정 없이 VGT와 WGT의 교체에 따른 특성을 비교하여 나타난 결과이며, EGR rate 및 VGT vane 최적화 시 PM의 양을 줄일 수 있다고 판단된다.

5) off-road용 엔진의 경우 현재 국내에서 WGT기술만 적용중이지만 VGT기술이 적용이 될 시 다양한 운전영역에서 보다 높은 터빈출력과 효율을 통한 엔진 출력의 향상과 연료소모량의 감소를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 특히, off-road엔진의 특성상 주로 높은 부하에서 운행되는데 VGT의 적용을 통해 이러한 운전영역에서도 높은 과급효율을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차기술개발사업단의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- [1] Heywood, J.B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw Hill, 1988.
- [2] M. Dürnholz, G. Eifler and H. Endres, Exhaustgas Recirculation - A Measure to Reduce Exhaust Emissions of DI Diesel Engines, SAE 920725, 1992.
- [3] L. Mikulic, M. Kühn, J. Schommers and E. Willig, Exhaust-emission Optimization of DIdiesel Passenger Car Engine with High-pressure Fuel Injection and EGR, SAE 931035, 1993.
- [4] Y.S. Park, B.G. Oh, M.K. Lee and M.W. Sunwoo, Development of Turbine Mass Flow Rate Model for Variable Geometry Turbocharger Using Artificial Neural Network, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B, Vol.34, No. 8, pp.783-790, 2010.
- [5] J. G. Hawley, F. J. Wallace, A. Cox, R. W. Horrocks and G. L. Bird, Variable geometry turbocharging for lower emissions and improved torque characteristics, IMechE, Vol. 213, Part D., 1999.
- [6] N. Waston and M. S. Janota, Turbocharging the Internal Combustion Engine, McMillan Press, Ch4, 1982.
- [7] J.E. Chung, J.W. Chung, J.H. Kang, Development of a turbine performance model in variable geometry turbocharger KASE Conference Proceedings, 2009, 214-219.
- [8] C.H. Hyun, K.H. Jung, C.S. Jung, B.M. Doo, Y. G. Koo. Comparison of WGT and VGT Turbocharger for EGR system of Heavy-Duty Diesel Engine for meeting EURO-V. KASE Conference Proceedings, 2008, 269-274.