

Off-road용 디젤엔진에서의 VGT 및 EGR 적용에 따른 엔진 배기 및 연비 특성 평가

하형수** · 신재식* · 정학섭** · 표수강** · 강정호*

*자동차부품연구원, **국계종합기계

An Evaluation of Emission Characteristics and Fuel Consumption on the Off-road Diesel Engine using VGT and EGR

Hyeongsoo Ha**, Jaesik Shin*, Haksup Jung**, Sukang Pyo** and Jungho Kang*

*Korea Automotive Technology Institute

**Department of R&D Center, Kukje Machinery Company

(Received 22 February 2016, Received in revised form 15 April 2016, Accepted 18 April 2016)

ABSTRACT

To meet the Tier-4 emission standard, a variety of combustion technology in the field of off-road engine has been applied in conjunction with the engine after treatment technology. In this study, as the basis study for applying VGT and HPL EGR to 3.6 L CRDi engine, exhaust gas characteristics and fuel economy characteristics are confirmed in accordance with VGT and EGR operating conditions. Consequently, in the EGR applicable conditions, 60% VGT vane duty condition was confirmed that the trade-off characteristics between NOx and smoke are advantageous. In addition, in view of BSFC, VGT vane duty is considered desirable to control at around 50%.

Key Words : Exhaust gas recirculation, Variable geometry turbocharger, Diesel engine, Fuel economy, Off-road engine

1. 서론

건설기계 및 농기계 분야 등에 사용되는 Off-road 엔진에 대한 수요는 꾸준히 증가하는 추세로, 이로 인한 대기환경에 미치는 영향에 대한 비중이 중요시 되고 있다. 이에 따라 Off-road 엔진에서 배출되는 배기가스에 대해 선진국을 중심으로 세계 각국에서 규제를 실시하고 있다. Off-road 엔진에 대한 배기규제는 On-road용 자동차와 함께 단계적으로 강력하게 강화되어 현 국내 적용 규제는 전 세계 최고 수준의 단계인 Tier-4에 해당하여 각 기술들의 최적 조합으로 달성해야 하며, 차후 적용될 새로운 규제[1]

를 대비하기 위한 관련 업계의 노력을 요하고 있다. 사용 출력 범위가 다양한 Off-road 엔진의 사용 특성상 디젤 엔진이 주를 이루고 있으며, 이에 따라 엔진에서 배출되는 PM 및 NOx의 저감이 주요 이슈이며 전 세계적인 온실가스 감축에 대한 요구에 따라 디젤엔진의 연비 개선 기술이 활발하게 적용되고 있다.

현재 디젤엔진 분야의 각종 연소기술 및 후처리 기술들이 개발되어 활발히 적용되고 있으며, 특히 커먼레일 엔진의 개발과 함께 DP(Diesel Particulate Filter) 및 SCR(Selective Catalytic Reduction) 등의 기술의 발달로 디젤엔진에서 배출되는 배기가스는 상당한 수준으로 저감이 가능하게 되었다.

엔진 연소 기술에서 EGR(Exhaust Gas Recirculation) 기술은 배기가스 일부를 흡기에 유입시켜 실린더 내 연소온도를 낮추어 NOx 발생을 억제시키는 기술로서 EGR Cooler의 적용과 함께 디젤엔진의 효과적인 NOx 저감 기술이며, 특히 터보차저 전단으로부터 흡기매니폴드로 배기가스를 공급하는 HPL(High

† Corresponding Author, hsha@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.

Pressure Loop) EGR은 적용의 용이성 및 흡기관련 부품내구성에 유리하여 활발하게 사용되고 있다. 흡배기 매니폴드 간 압력차를 이용하는 HPL EGR 특성상 과급 성능에 영향을 미치며[2-4] 이에 따라 EGR 적용 엔진에 과급량을 다양하게 제어할 수 있는 VGT (Variable Geometry Turbocharger)는 EGR 밸브 제어와의 상호 제어를 통해 목적에 따라 과급량 및 EGR 량을 적정하게 조정함으로써 연비 및 배기성능 향상을 가능하게 한다.

관련 연구로서, Park 등[5]은 2 L급 승용 디젤엔진에서 배압조절 밸브 및 ETC(Electronic Throttle Control)를 적용한 저압 EGR 시스템의 제어에 따른 배출가스 특성을 고압 EGR 시스템과 비교하여 저압 EGR 시스템의 과급압 제어 용이성 등으로 PM, NO_x 간 trade-off 특성 관계 및 연비 및 열효율이 우수함을 보고하였다. Han 등[6]은 LPL(Low Pressure Loop) 및 HPL EGR과 WGT(Waste Gate Turbocharger)가 적용된 6 L 급 산업용 디젤엔진을 HPL/LPL EGR 시스템 및 VGT로 변경하여 저온연소를 구현하여 실험계획법을 통해 각 요소기술의 영향력을 파악하였다. 또한 Jeong 등[7]은 VGT와 EGR을 적용한 PCCI(Premixed Charge Compression Ignition) 연소방식의 디젤엔진을 대상으로 VGT 및 EGR의 운전조건이 배기가스 특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

따라서 본 연구에서는 Off-road 엔진의 VGT 개도 및 EGR 밸브 개도에 따른 연비성능 및 배기성능을 확인하기 위해 VGT 베인 개도와 HPL EGR 밸브 개도를

달리하여 다음의 실험을 진행하였으며 이를 통해 차후 진행될 관련 연구의 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험을 위한 장치는 Fig. 1과 같이 실험용 엔진을 포함한 240kW급 EC 동력계, 배기분석계, 광투과식 매연측정기, 연료 컨트롤러, 냉각수 컨트롤러 및 데이터 취득 시스템으로 구성되었으며, 실험에 사용된 엔진은 Off-road용 common-rail 엔진으로 HPL EGR과 흡기시스템으로 VGT 및 인터쿨러가 적용되었다. Table 1에 실험용 엔진에 대한 사양을 나타내었다.

실험조건에서 엔진회전수는 실험용 엔진이 최대 Torque를 가지는 엔진회전수 조건인 1,600 rpm에서 부하조건을 90 Nm, 130 Nm, 170 Nm 및 210 Nm로 설정하였다. 이때 분사압력은 1,200 bar에서 1,500 bar 사이에서 제어되었다. 선택한 각 부하 조건에서 VGT 베인 개도율(0%에서 최대개방)을, 선행 연구에서 최저 연료소모율 조건이 존재하는 범위를 가

Table 1. Specification of test engine

Type	4 stroke/4 cylinder
Displacement volume [cc]	3,621
Bore × Stroke [mm]	98×120
Intake system	Turbocharger (VGT), Intercooler
Type of fuel injection	CRDi

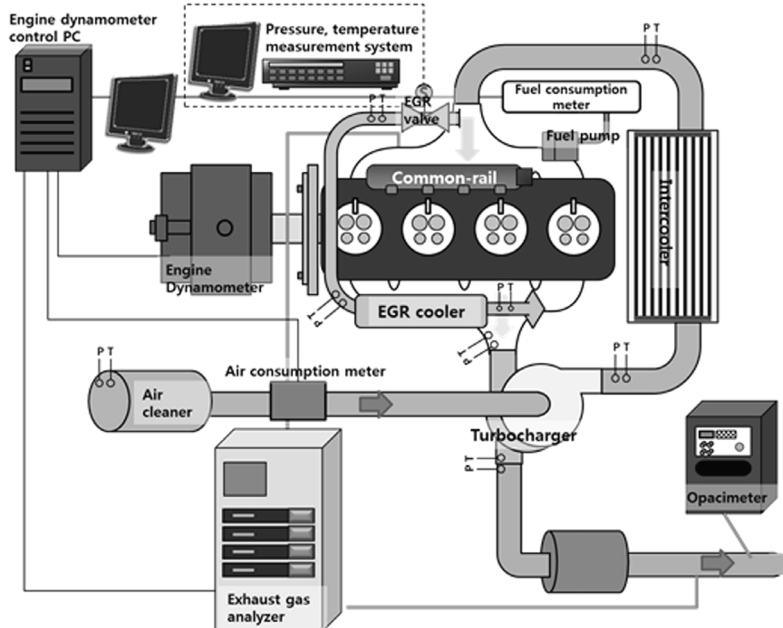


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 2. Experimental conditions

Parameter	Level			
Engine speed [rpm]	1600			
Torque [Nm]	90	130	170	210
Fuel quantity [kg/h]	4.11	5.44	6.94	8.39
VGT vane duty [%]	40, 50, 60			
EGR valve position [%]	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70			

진다고 판단되는 40%, 50% 및 60% 수준으로 변경하였으며 각 VGT 베인 개도 조건에서 EGR 밸브 개도를 0%에서 70%까지 10% 단위로 변경하여 이에 따른 NOx 및 Smoke 배기특성 및 연비특성을 측정하였다.

Table 2에 실험 변수와 각 변수에 대한 수준을 나타내었다.

본 실험에서 EGR율은 엔진 실험에서 EGR 밸브 개도에 따라 변동되는 흡기매니폴드 내 CO₂ 측정 분율 및 배기가스 내 CO₂ 분율을 측정하여 계산하였으며 EGR율 계산에 사용된 식은 다음과 같다.

$$EGRrate(\%) = \frac{[CO_2]_i - [CO_2]_{amb}}{[CO_2]_e - [CO_2]_{amb}} \times 100 \quad (1)$$

where i : Intake gas
 e : Exhaust gas
 amb : Ambient

3. 결과 및 고찰

3.1. 엔진 부하 별 과급 및 EGR 적용에 따른 배기가스 배출 특성

운전조건에 따른 EGR율 변화는 흡배기 매니폴드 간 형성된 차압 및 EGR 밸브 개도에 따라 결정되며 일정 개도량 이상에서 흡배기 매니폴드 간 차압이 약 100 mbar 정도로 수렴함에 따라 크게 감소함을 보인다.

Fig. 2는 각 VGT 베인 개도에서 EGR 율 변화에 따른 NOx 배출 특성을 나타낸 그래프이다. NOx는 EGR율 증가에 따라 비교적 선형적으로 감소하며 동일 EGR율 대비 VGT 베인 개도 duty가 낮을수록 NOx

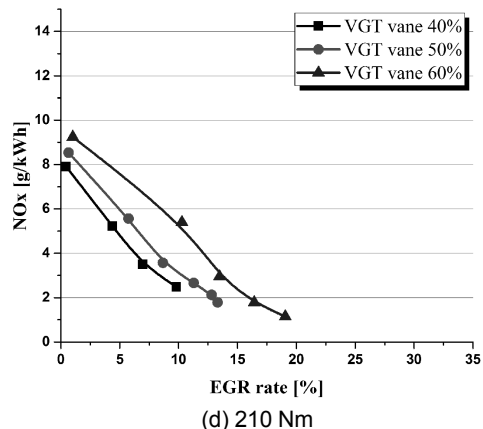
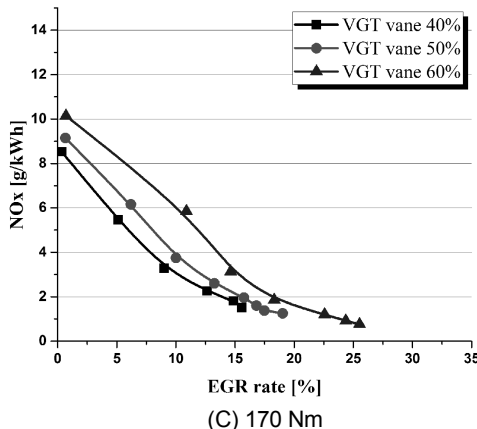
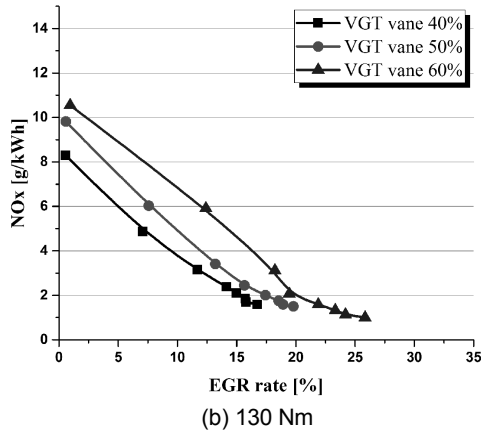
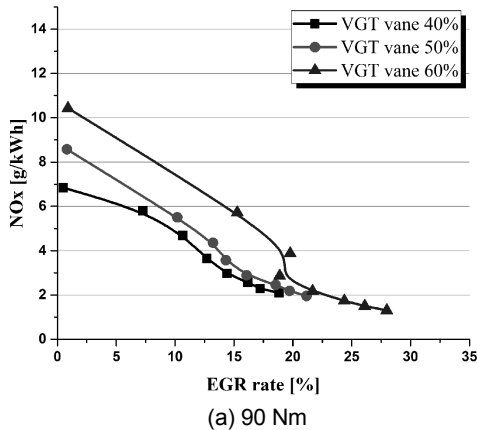


Fig. 2. NOx emissions with respect to EGR rate and VGT vane duty(load ; 90 Nm, 130 Nm, 170 Nm, 210 Nm).

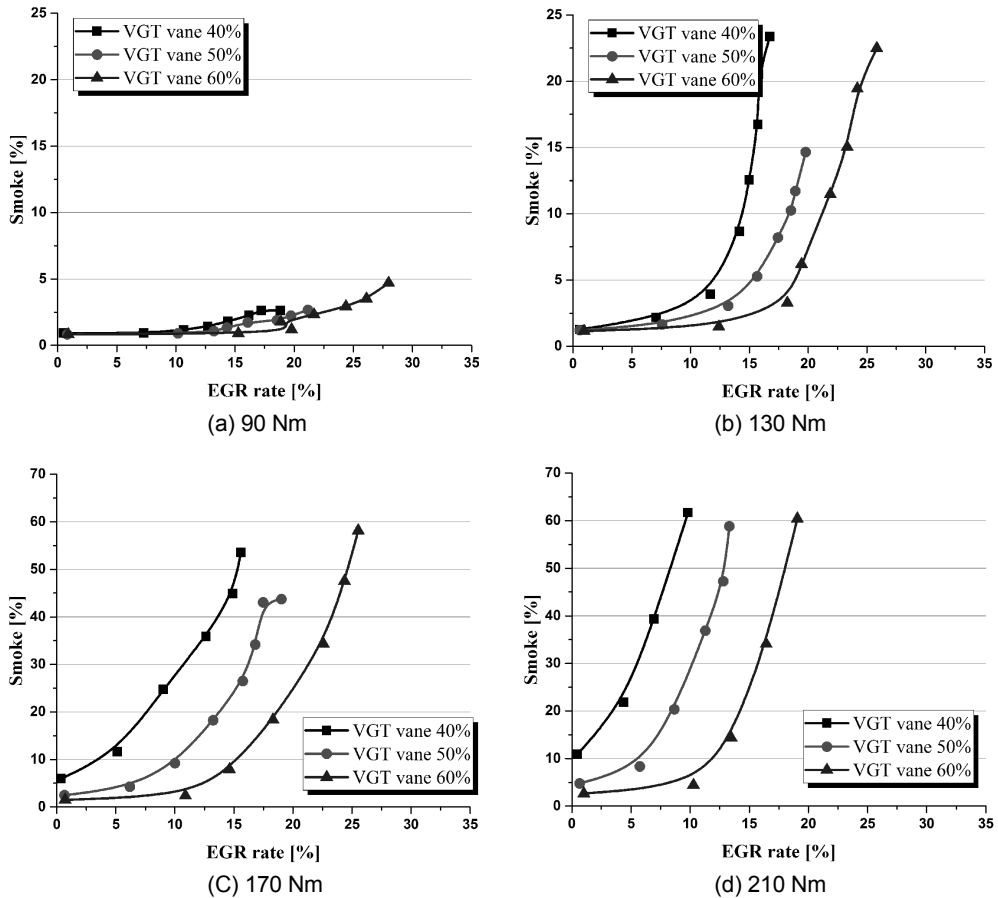


Fig. 3. Smoke emissions with respect to EGR rate and VGT vane duty(load ; 90 Nm, 130 Nm, 170 Nm, 210 Nm).

배출량이 낮으며 EGR을 증가에 의한 영향이 미소하게 커짐을 알 수 있다. 이는 과급에 따른 연소온도 증가에 따른 영향으로 분사율이 높은 고부하 영역일수록 이러한 경향이 커짐이 확인된다. 이러한 결과는 NOx 저감 측면에서 과급-EGR 제어 전략 구성 시 동일 EGR율을 요하는 경우, 낮은 과급압력에서 EGR 밸브 개도를 높이는 방법이 비교적 유리하다고 판단되며, NOx 저감을 위한 EGR율의 추가 확보를 필요 시 VGT 베인 개도를 좁혀 EGR 차압을 형성하는 것 또한 배기가스 저감 측면에서 합리적이라 판단된다.

Fig. 3은 각 VGT 베인 개도에서 EGR율 변화에 따른 Smoke 배출 특성을 나타낸 그래프이다. Smoke 배출 특성은 Torque 130 Nm 이상 조건에서 EGR율 증가에 따라 기 연구 결과에서 보고된 바와 같이 EGR율 증가에 따라 연소 불안정 및 생성 Soot 미연소 등의 원인으로 증가한다. 또한 Smoke 배출은 특정 EGR율을 기준으로 급등하는 경향을 보이며, 이러한 급등 경향은 실린더 내 산소 분율에 기인하여 부하(연료량) 증가에 따라 Smoke 배출량의 급등이 시작되

는 EGR율이 낮아짐이 확인된다.

엔진 특성 상 EGR 미 적용 조건에서 A/F 30 이상으로 확인된 영역으로, 연료 분사량이 비교적 적고, 이에 따른 EGR 가스 내 산소분율이 비교적 높은 저부하 영역(90 Nm)에서는 VGT 베인 개도에 따른 영향이 미미하며, Smoke 배출 5% 미만 수준을 유지함을 보인다.

또한 VGT 베인 개도 duty 증가에 따른 과급압력 증가에 따라 Smoke 배출이 감소하는 경향을 보이고 Smoke 배출의 증가율이 급격히 증가하기 시작하는 EGR율 또한 높아지는 경향을 보인다. 이는 해당 엔진의 VGT-EGR 제어 전략 구성 시 엔진의 과급압력 조건에 따라 달라지는 Smoke 배출 급등 조건에 유의하여야 한다는 것을 나타낸다.

3.2. 엔진 부하 별 과급 및 EGR 적용에 따른 BSFC 특성

VGT-EGR 개도 적용에 따른 연료소비율 특성은 Fig. 4에 나타내었다. BSFC(Brake Specific Fuel Con-

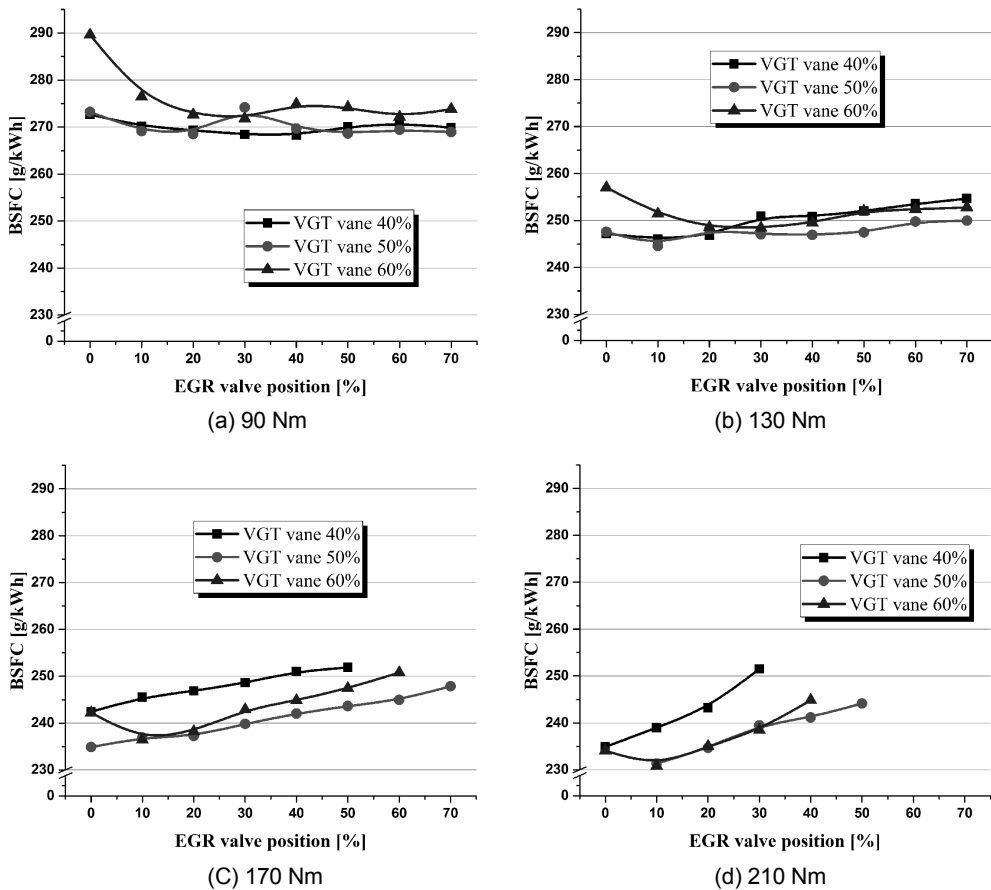


Fig. 4. BSFC with respect to EGR valve position and VGT vane duty (load ; 90 Nm, 130 Nm, 170 Nm, 210 Nm).

sumption)는 전체적으로 EGR을 증가에 따라 높아지는 경향을 가지나 VGT 개도 duty 60%의 경우 EGR 밸브 개도 0% 적용 시 연비 측면에서 과도하게 높게 형성되어 펌핑손실로 작용하는 배기압력이 EGR 밸브 개방에 따라 낮아져 터보차저의 토크 손실이 대폭으로 회복되었다가 EGR을 증가에 따른 연소효율 저하로 점차 BSFC가 증가하는 경향을 보인다.

90 Nm 조건에서는 펌핑손실이 악화되는 VGT 베인 개도 60%의 낮은 EGR 밸브 개도 조건을 제외하고 EGR을 증가에 따른 BSFC 증가 경향은 미미한데 이는 저부하 영역에서는 생성되는 배기가스 내 산소분율이 상대적으로 높아 상기의 동일 조건에서의 EGR 적용에 따른 Smoke 증가가 미미한 이유와 마찬가지로, EGR 적용이 연소실 내 산소분율을 크게 낮추지 못하기 때문으로 판단되어 엔진의 EGR 적용 전략 구성 시 이러한 저부하 영역에서 EGR을 집중적으로 적용하는 것이 배기가스특성 및 연비 측면에서 유리하다고 판단된다.

전체 Torque 영역에서 VGT 베인 개도를 좁게 설정하는 경우 악화되는 BSFC 특성은 비교적 낮은 수

준의 EGR 적용을 통해 보완이 가능하며 이는 과급량 증가를 통한 배기가스 특성 개선의 이점을 활용하기 위해 목표 VGT 베인 개도를 결정할 시 EGR 밸브 개도 유무를 반드시 고려해야 할 것으로 사료된다.

EGR이 적용된 경우, 연비 측면에서 BSFC가 최소가 되는 VGT 베인 개도 duty는 약 50% 내외에 존재하는 것으로 확인되며 부하 증가에 따라 40%~60% 범위 내에서 미소하게 증가하는 것으로 판단된다.

본 실험용 엔진에서 EGR이 적용된 경우 연비 개선을 위한 VGT 베인 개도 duty는 40%~60% 범위에서 제어하는 것이 적합하며, 부하 증가에 따라 BSFC가 최소가 되는 VGT 베인 개도 duty는 증가함을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 Off-road용 CRDi 엔진의 VGT, HPL EGR 적용에 따른 배기특성 및 연비특성을 확인하기 위해 실험용 엔진의 엔진회전수 1,600 rpm 조건에서, 각 부하별로 VGT 베인 개도 및 EGR 밸브 개도

를 변경하여 실험을 진행하였으며 그 결론은 다음과 같다.

1) NOx 저감 측면에서 동일 EGR율을 적용 시 낮은 흡배기 배압 조건에서 EGR 밸브 개도를 크게 하는 것이 유리하다.

2) 배기가스 저감 측면에서 NOx-Smoke 간 trade-off 특성을 고려할 때 VGT 베인 개도를 좁혀 과급압력을 높일수록 유리하며, 부하가 높을수록 효과가 크다.

3) VGT 베인 개도를 좁혀 과급량을 증가시키는 경우 일정 베인 개도 이상에서 펌핑손실 발생으로 인해 연비특성이 악화되나 이는 EGR 밸브 개도 증가에 따라 배기압력 감소로 BSFC가 회복되고, 점차 연소특성 악화로 다시 높아진다.

4) 실험 조건에서 EGR 밸브 개도 0%~30% 조건을 제외하고 VGT 베인 개도 duty는 40%~60% 사이에서 최저 BSFC 값을 가지는 것으로 확인된다.

후 기

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

References

- [1] S. Joo, The Diesel Market Trend in USA, *Auto Journal*, 2014. 01 (2014) 58-62.
- [2] J. Hussain, K. Palaniradja, N. Alagumurthi and R. Manimaran, Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Performance and Emission characteristics of a Three Cylinder Direct Injection Compression Ignition Engine, *Alexandria Engineering Journal*, 51 (2012) 241-247.
- [3] C. E. Roberts, C. Stovell, R. Rothbauer and D. Mehta, Advancement in Diesel Combustion System Design to Improve the Smoke-BSFC Tradeoff, *International Journal of Automotive Engineering*, 2 (2011) 55-60.
- [4] M. Kobayashi, Y. Aoyagi, T. Adachi, T. Murayama, M. Hashimoto, Y. Goto and H. Suzuki, Effect of BSFC and NOx Reduction on Super Clean Diesel of Heavy Duty Diesel Engine by High Boosting and High EGR Rate, *SAE International*, 2011-01-0369 (2011).
- [5] J. H. Park, J. H. Lim and J. K. Yoon, A Study on the Engine Performance and Emission Characteristics in a LP EGR System with Electronic Throttle Control, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 35(4) (2011) 379-387.
- [6] Y. D. Han, E. J. Shim, S. H. Shin and D. S. Kim, A Study of Low Temperature Combustion System Optimization for Heavy Duty Diesel Engine, *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, 23(2) (2015) 178-184.
- [7] S. J. Jeong, S. W. Chung, J. H. Kang and W. Kang, The Effect of Control of the VGT and EGR in a Turbocharged Common-Rail Diesel Engine on Emissions under Partial Loads Conditions, *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, 15(6) (2007) 151-158.