

VGT가 디젤엔진의 부분부하 성능에 미치는 영향

최권식* · 송성진**

Effects of VGT on Part Load Performance of Diesel Engine

Kwon Sick Choi* and Seung Jin Song**

Key Words : Turbocharger(과급기), VGT(가변 형상 과급기), EGR(배기가스 재순환)

ABSTRACT

Recently, the application of variable geometry turbocharger (VGT) to the high speed direct injection (HSDI) diesel engine has gained more and more interest in automotive industry. A steady state experimental investigation has been undertaken on a 1.5L HSDI diesel engine to verify the benefits of VGT comparing to the standard engine having a waste gate turbocharger (WGT). Specifically, part load performances (e.g., fuel economy and emission) have been investigated under various vane angles of the VGT. The results show that the real exhaust gas recirculation (EGR) rate as well as the pumping loss is very important to improve break specific fuel consumption (BSFC). It was previously known that the pumping loss only is a main parameter. In addition, the trade-off relationship between BSFC and NOx according to boost pressure, and the decreasing tendency of NOx with increasing real EGR rate have been verified. 1-D numerical analysis also has been performed, and the numerical results are in good agreement with experimental results.

1. 서론

Turbocharger는 동일 축 상의 압축기와 터빈, 하우징, 그리고 기계식 및 전자식 제어 액추에이터로 구성되어 있는 터보기계이다. 이는 엔진의 회전속도를 증가시키지 않고 엔진의 출력을 30~40%까지 향상시킬 수 있으며 출력 당 엔진의 중량과 부피가 작아져서 엔진의 소형화, 경량화가 가능하고 연료소비율이 개선될 수 있다는 장점으로 인하여 소형의 고속 디젤엔진을 중심으로 널리 사용된다.

Turbocharger는 Matching point의 유량 조건에서는 효율적으로 작동하지만, 유량이 적으면 과급 효과가 빈약하게 되고 유량이 많으면 터빈의 overspeed 및 Pumping loss 증가시킨다. 이러한 문제를 극복하기 위해 고속에서 배기가스의 일부를 bypass 시키는 WGT(Waste Gate Turbocharger)가 많이 적용되지만, 최근에는 Vane 각도 변경으로 배기가스 유로를 조절하여 저속 및 고속에서의 과급 압력을 조절할 수 있는 VGT(Variable Geometry Turbocharger)가 널리 적용된다^{(1),(2)}.

J. G. Hawley 등⁽³⁾은 디젤엔진의 부분부하 실험에서 VGT를 적용하여 부스트압력 변화에 따른 BSFC 변화를 정량적, 정성적으로 보였고, Yohan Chi 등⁽⁴⁾과 Jaehoon Cheong 등⁽⁵⁾은 디젤엔진의 부분부하 실험에

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : kschoi22@snu.ac.kr

서 VGT를 적용하여 부스트압력을 최소로 작게 함으로써 Pumping loss가 감소되어 BSFC가 현저히 감소됨을 보였다.

본 연구에서는 디젤엔진의 부분부하 실험에서 Turbocharger를 WGT에서 VGT로 변경함에 따라 부스트압력 변화에 따른 BSFC와 Pumping loss의 관계 및 엔진의 성능 특성에 미치는 영향을 규명한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1. 실험 장치

2.1.1. 실험 엔진 및 동력계

Fig. 1은 동력계에 설치된 실험 엔진과 주변 장치의 구성을 나타낸다. 실험에 사용된 엔진은 직렬 3기통의 1.5L HSDI(High Speed Direct Injection) 디젤엔진으로 주요 제원은 Table 1과 같다. Emulation ECU, 통신 모듈(ES-690), 컴퓨터를 사용하여 운전 변수를 실험

Table 1 Specifications of test engine

Description	Specifications
Cylinder arrange	In line 3 cylinder
Displacement	1493.3 cc
Bore × Stroke	83 mm × 92 mm
Compression ratio	17.7
Fuel injection system	BOSCH CRDI
Max. Torque	170 Nm / 2000 rpm
Max. Power	56 kW / 4000 rpm

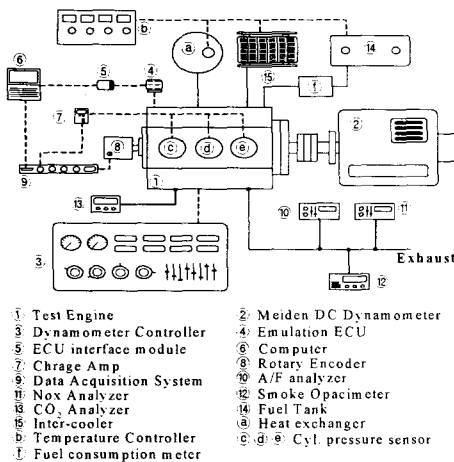


Fig. 1 Schematic diagram of test engine

시간으로 제어한다. 각 실린더에 설치된 압력 센서와 Data acquisition system을 통하여 실린더의 압력을 측정하고 여러 분석 장비를 통하여 부스트압력, 연료 소비율, 공연비, NOx, 실제 EGR rate를 측정한다. 실제 EGR rate는 흡기 중 CO₂의 농도를 측정하여 환산한다⁽⁶⁾. 그 외에도 흡기 및 배기 시스템에 여러 개의 열전대와 압력계를 설치하여 온도와 압력을 측정한다. 정밀한 실험을 위하여 엔진 냉각수를 비롯하여 흡기 온도, 연료 온도를 제어한다.

2.1.2. Turbocharger 및 EGR

Turbocharger는 WGT 및 VGT가 있고, Fig. 2는 VGT의 구조 및 작동 원리를 나타낸다. WGT는 특정 운전 영역에서 하나의 작동 점을 가져 압축기의 압력비가 고정되지만, VGT는 배기가스가 적게 배출되는 저속 영역에서는 Nozzle의 면적을 좁혀 배기가스 유로를 축소시켜 터빈의 구동력을 높여주고, 배기가스가 많이 배출되는 고속 영역에서는 Nozzle의 면적을 넓혀 배기가스 유로를 확대시켜 압축기의 압력비를 높여준다. 따라서 배기가스 유로의 정밀 제어를 통해 저속 및 고속의 전 영역에서 터빈의 구동력을 높여줌으로서 충분한 공기가 흡입되어 최적의 연소로 불완전 연소를 감소시켜 연비가 향상되고 배기가스도 저감된다.

EGR(Exhaust Gas Recirculation)은 배기의 일부를 흡기로 순환시켜 신기를 희석시킴으로써 연소 온도를 낮추어 NOx을 저감하는 기술을 말한다. 시스템은 배기와 흡기가 관으로 연결되고 중간에 밸브를 설치하여 밸브의 열림 정도를 제어한다. EGR의 구동력은 흡기와 배기의 압력차이며 배기가 흡기보다 압력이 낮은

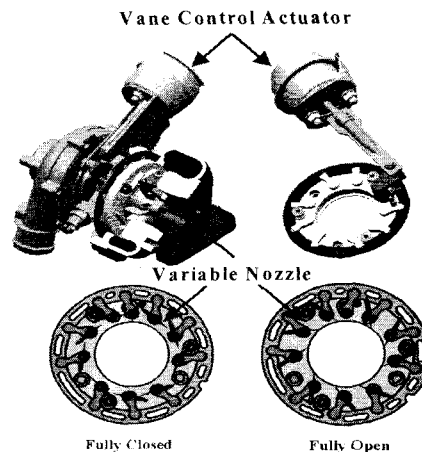


Fig. 2 Schematic diagram of VGT

경우는 EGR이 불가능하다. 그리고 일반적으로 EGR은 토크의 감소를 동반하는 단점이 있다^{(1),(6)}.

VGT는 Vane의 각도 변경으로 배기(터빈의 입구)의 압력이 변화하고 이에 따라 흡기(압축기의 출구)의 압력도 변화하여 EGR에 중요한 영향을 미친다.

2.2. 실험 방법

2.2.1. 실험 조건

시내 주행 모드에서 가장 빈번하게 이용되는 세 가지 부분부하 조건을 기준으로 선정된 엔진의 실험 조건은 Table 2와 같다.

각 실험 조건에서 EGR 밸브 duty(EGR 밸브의 열림 정도)의 설정은 Table 3과 같다. 엔진 속도와 토크가 동일한 경우인 2500rpm, 50Nm에서는 EGR 밸브 duty가 WGT의 60%를 기준으로 VGT의 0%, 60%, 100%로 설정하고, 엔진 속도는 동일하나 토크가 다른 경우인 2000rpm, 75/25Nm에서는 EGR 밸브 duty가 WGT를 기준으로 VGT도 동일하게 설정한다.

2.2.2. 실험 변수

디젤엔진에서의 주요 운전 변수는 부스트압력, EGR 밸브 duty, 주 분사시기(Main injection timing), 주 분사시간(Main injection duration), 분사압력(Injection pressure), 파일럿 분사시기(Pilot injection timing), 파일럿 분사시간(Pilot injection duration) 등이 있다. 여기서 Turbocharger를 WGT에서 VGT로 변경함에 따라 실제 엔진의 실험에서 중요한 영향을 미치는 변수

인 부스트압력, EGR 밸브 duty만을 조절하여 제어하고, 나머지 변수는 양산 엔진의 데이터를 그대로 사용한다. 또한 각 실험 조건 및 EGR 밸브 duty에 따라 VGT의 Vane의 각도를 조절하여 부스트압력을 최소화에서 최대까지 변화하도록 제어하고, 항상 동등 수준의 토크를 유지하기 위해 주 분사시간을 조절하여 연료량을 제어한다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 엔진 속도와 토크가 동일한 경우

2500 rpm, 50 Nm에서 EGR 밸브 duty가 WGT의 60%를 기준으로 VGT의 0%, 60%, 100%로 설정한다.

3.1.1. Pumping loss

PMEP(Pumping Mean Effective Pressure)는 흡기와 배기 행정 동안에 일어나는 일 전달량을 말하며 전체 일을 감소시키므로 Pumping loss라고도 한다⁽¹⁾.

BSFC(Brake Specific Fuel Consumption)는 엔진의 실험에서 소모된 연료량을 나타내는 변수로 단위동력에 대한 연료소비율을 말한다⁽¹⁾.

Fig. 3은 엔진의 1사이클에 있어서 실린더내의 체적과 피스톤에 작용하는 압력의 변화를 P-V 선도로 나타낸다. 2500 rpm, 50 Nm의 실험 조건에서 WGT는 부스트압력이 140 kPa로 고정되어 PMEP가 63 kPa이 되지만, VGT는 부스트압력을 변경하여 최소 106 kPa이 되면 PMEP도 최소 37 kPa이 된다. 따라서 VGT를 적용하여 부스트압력을 작게 함으로써 Pumping loss도 현저히 감소시킬 수 있다.

Table 2 Experimental condition

Engine speed (rpm)	Torque (Nm)
2500	50
2000	75
	25

Table 3 Settings of EGR Valve duty

Experimental condition		WGT	VGT
Engine speed	Torque		
2500 rpm	50 Nm	60 %	0 %
			60 %
			100 %
2000 rpm	75 Nm	58 %	58 %
	25 Nm	77 %	77 %

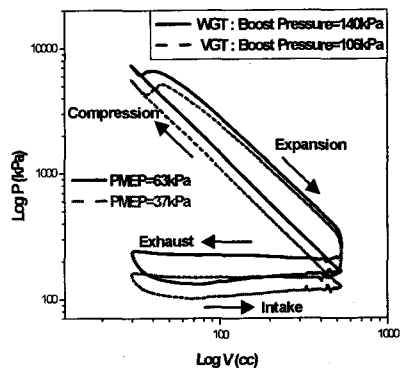
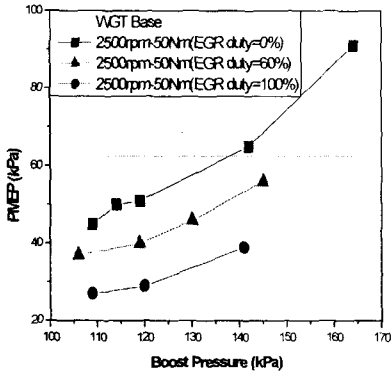
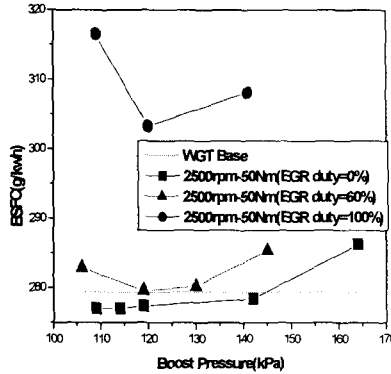


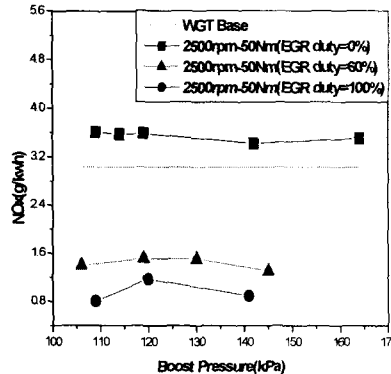
Fig. 3 Comparison of PMEP between WGT and VGT (2500 rpm, 50 Nm)



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 (a) PMEP, (b) BSFC, and (c) NOx versus Boost pressure(2500 rpm, 50 Nm)

3.1.2. 엔진의 성능 특성

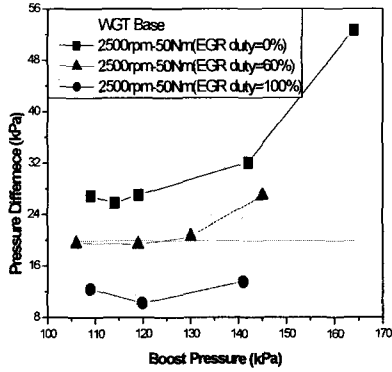
Fig. 4 (a), (b)에서 EGR 밸브 duty가 0% 일 때 (EGR이 전혀 없을 때)는 PMEP가 점점 감소함에 따라 BSFC도 점점 감소하지만, EGR 밸브 duty가 60%와 EGR 밸브 duty가 100% 일 때(EGR이 있을 때)에

는 PMEP가 점점 감소함에 따라 BSFC도 점점 감소하다가, 부스트압력이 120 kPa부터는 다시 커진다. 이는 EGR이 있을 때에는 VGT의 부스트압력을 점점 작게 할수록 PMEP도 계속 감소하지만, Fig. 5 (b)와 같이 실제 EGR rate은 점점 감소하다가 부스트압력이 120 kPa부터는 거의 동등 수준으로 유지된다. 따라서 부스트압력이 120 kPa 이하에서는 PMEP의 감소에도 불구하고 실제 EGR rate는 계속 동등 수준으로 유지됨에 따라 토크가 상대적으로 많이 감소함으로써 동등 수준의 토크를 유지하기 위해 연료량을 더 많이 분사하게 되어 BSFC의 증가를 초래하게 된다. 그러므로 전 부하 실험에서는 EGR이 없기 때문에 부스트압력을 최소로 하여 BSFC도 최소로 할 수 있지만, 부분 부하 실험에서는 EGR이 있기 때문에 부스트압력을 최소로 하여 BSFC를 최소로 할 수 없으므로 PMEP와 실제 EGR rate을 동시에 고려한 부스트압력의 최적화 작업이 반드시 필요하다.

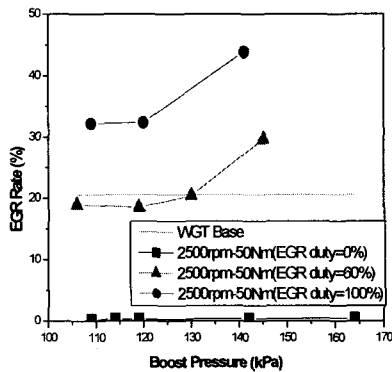
Fig. 4 (b), (c)에서 VGT의 부스트압력 변화에 따른 BSFC와 NOx의 관계는 EGR 밸브 duty에 따라 각각 BSFC가 증가하면 NOx는 감소하고, BSFC가 감소하면 NOx는 증가하므로 서로 상반된 관계(trade-off)가 있다. 그러나 같은 부스트압력에 따라 EGR 밸브 duty가 점점 증가하면 BSFC는 증가하지만, NOx는 점점 감소한다. 이는 Fig. 5 (b)에서 같은 부스트압력에 따라 EGR 밸브 duty가 증가하면 실제 EGR rate도 증가함에 따라 토크가 많이 감소함으로써 동등 수준의 토크를 유지하기 위해 연료량을 더 많이 분사하게 되어 BSFC의 증가를 초래하게 된다. 그러므로 Turbocharger를 WGT에서 VGT로 변경함에 따라 엔진의 성능 특성을 향상시키기 위해서는 BSFC와 NOx를 동시에 감소시키는 부스트압력에 따른 EGR 밸브 duty의 최적화 작업이 반드시 필요하다.

3.1.3. 실제 EGR rate

Fig. 5 (a), (b)에서 VGT의 부스트압력 변화에 따라 흡기와 배기의 압력차가 증가하면 실제 EGR rate도 같은 경향으로 증가한다. 즉 흡기와 배기의 압력차가 실제 EGR rate의 구동력이 된다. 그러나 같은 부스트압력에 따라 EGR 밸브 duty가 증가하면 흡기와 배기의 압력차는 점점 감소하지만, 실제 EGR rate는 증가한다. 이는 EGR 밸브의 열림 정도가 blockage 역할을 하기 때문에 흡기와 배기의 압력차보다 EGR 밸브 duty가 실제 EGR rate에 더 큰 영향을 미친다.



(a)

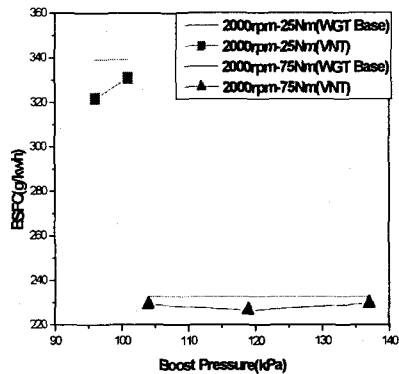


(b)

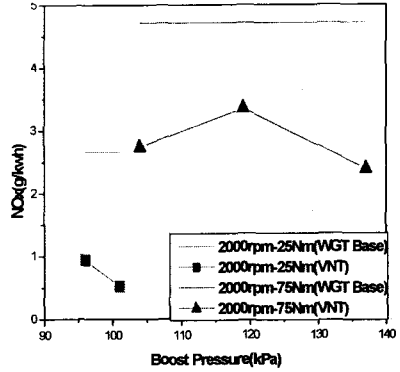
Fig. 5 (a) Pressure difference and (b) EGR rate versus Boost pressure(2500 rpm, 50 Nm)

3.2. 엔진 속도는 동일하나 토크가 다른 경우

2000 rpm, 75 / 25 Nm에서 EGR 밸브 duty가 WGT 를 기준으로 VGT도 동일하게 설정한다.

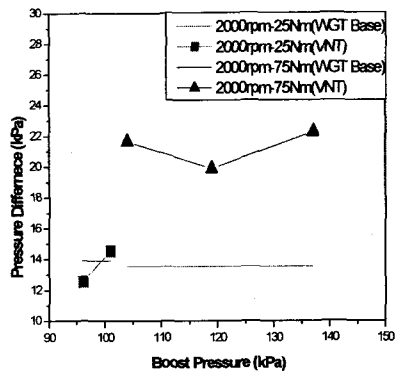


(a)

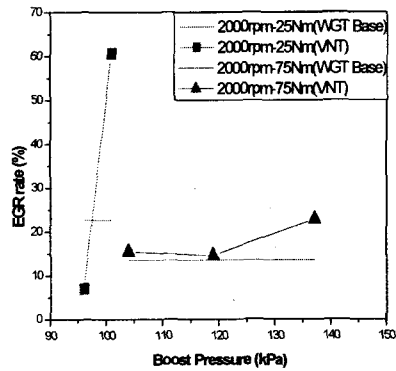


(b)

Fig. 6 (a) BSFC and (b) NOx versus Boost pressure (2000 rpm, 75 / 25 Nm)



(a)



(b)

Fig. 7 (a) Pressure difference and (b) EGR rate versus Boost pressure(2000 rpm, 75 / 25 Nm)

3.2.1. 엔진의 성능 특성

Fig. 6 (a), (b)에서 VGT의 부스트압력 변화에 따른 BSFC와 NOx는 서로 상반된 관계(trade-off)가 있다.

그리고 엔진 속도는 동일하나 토크가 작을 때에는 토크가 클 때 보다 BSFC는 크지만, NOx는 작다.

3.2.2. 실제 EGR rate

Fig. 7 (a), (b)에서 VGT의 부스트압력 변화에 따라 흡기와 배기의 압력차가 증가하면 실제 EGR rate도 같은 경향으로 증가한다. 즉 흡기와 배기의 압력차가 실제 EGR rate의 구동력이 된다. 그러나 엔진 속도는 동일하나 토크가 작을 때에는 전체 배기가스 유량이 매우 작으므로 실제 EGR rate가 상대적으로 크다.

4. 1차원 수치 해석

4.1. 해석 방법

4.1.1. 프로그램 구성

1차원 해석을 위해 상용 프로그램인 AVL Boost를 사용하여 Fig. 8과 같이 System algorithm을 실린더, Turbocharger, 파이프, 에어클리너, 인터쿨러 등의 각 부품으로 구성한다.

4.1.2. 프로그램 변수

엔진에서 1차원 수치 해석은 엔진의 가스 교환과 사이클의 시뮬레이션을 말한다. 실린더는 엔진 내부의 유동 현상에 영향을 주는 형상 변수에 대한 고려는 하지 않고, 연료량은 실험으로 얻어진 값을 사용한다. 그 외에 Turbocharger, 파이프, 에어클리너, 인터쿨러 등은 각각의 데이터베이스를 참고한다. 각 구성 요소는 파이프로 연결되고 실제 측정된 값을 사용하고, 이 때 파이프 내의 현상에 대한 고려도 가능하다⁽⁷⁾.

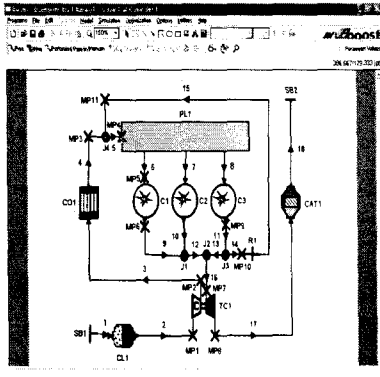
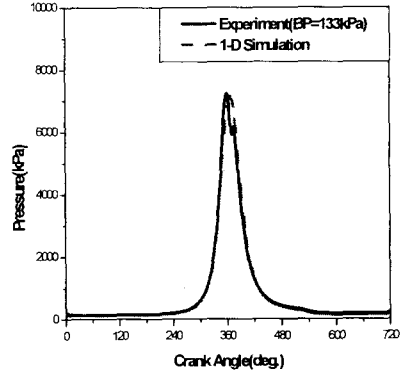
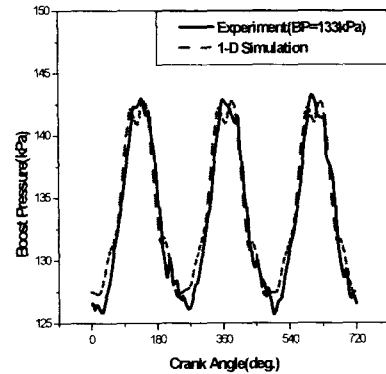


Fig. 8 System algorithm of 1-D simulation



(a)



(b)

Fig. 9 Comparison of (a) cylinder and (b) boost pressure between experiment and simulation (2500 rpm, 50 Nm)

4.2. 해석 결과

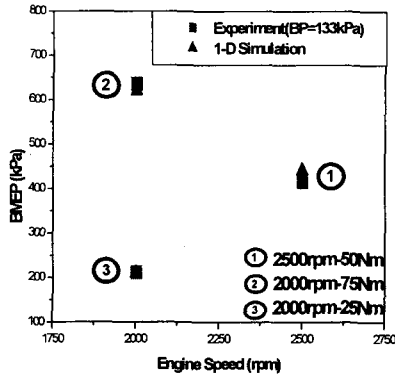
4.2.1. 실린더 및 부스트 압력 비교

Fig. 9 (a), (b)에서 크랭크 각도 변화에 따른 실린더압력 및 부스트압력에 대해 엔진의 실험 결과와 1차원 해석 결과를 서로 비교한다. 그 결과 거의 같은 경향을 나타냄으로써 엔진의 1차원 수치 해석이 매우 타당성이 있다.

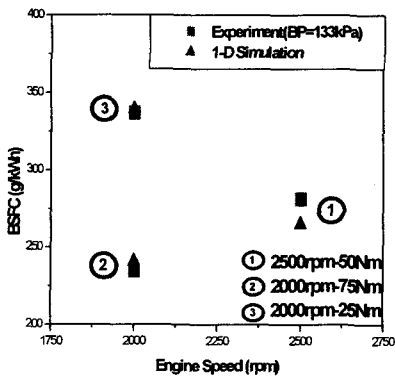
4.2.2. 엔진의 성능 비교

BMEP(Brake Mean Effective Pressure)는 엔진이 일을 할 수 있는 능력인 토크를 엔진의 치수에 관계없이 엔진의 성능을 나타내기 위한 변수로써 사이클 일을 행정체적으로 나눈 값을 말한다⁽¹¹⁾.

Fig. 10 (a), (b)에서 네 가지 엔진의 부분 부하 실험에 따른 BMEP 및 BSFC에 대해 엔진의 실험 결과



(a)



(b)

Fig. 10 Comparison of (a) BMEP and (b) BSFC between experiment and simulation

와 1차원 해석 결과를 서로 비교한다. 그 결과 정성적, 정량적으로 거의 같은 값을 나타냄으로써 1차원 수치 해석을 통한 엔진의 성능 예측은 초기 설계에 요구되는 여러 설계 변수의 특성을 얻을 수 있고, 실제 엔진의 실험에 비해 설계 기간 및 비용을 절감 할 수 있다.

5. 결론

Turbocharger를 WGT에서 VGT로 변경함에 따른 디젤엔진의 부분 부하 실험 결과와 엔진의 1차원 해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 엔진의 운전 조건에서 WGT는 부스트압력이 고정되지만, VGT를 적용하면 부스트압력을 작게 함으로써 Pumping loss를 감소시켜 BSFC의 감소가 가능하다. 그러나 EGR이 있을 때에는 부스트압력에 따른 BSFC의 최적화 작업이 반드시 필요하다.

2) 엔진의 운전 조건에서 VGT의 부스트압력 변화에 따른 BSFC와 NOx는 서로 상반된 관계(trade-off)가 있다. 따라서 Turbocharger를 WGT에서 VGT로 변경함에 따라 엔진의 성능 특성을 향상시키기 위해서는 EGR 밸브 duty에 따라 BSFC와 NOx를 동시에 감소시키는 최적화 작업이 반드시 필요하다.

3) 엔진의 운전 조건에서 VGT의 부스트압력 변화에 따라 흡기와 배기의 압력차가 증가하면 실제 EGR rate도 같은 경향으로 증가한다. 즉 흡기와 배기의 압력차가 실제 EGR rate의 구동력이 된다.

4) 엔진의 운전 조건에서 엔진의 실험 결과와 1차원 수치 해석 결과를 서로 비교한 결과 매우 타당성이 있다. 따라서 1차원 수치 해석은 초기 설계에 요구되는 여러 설계 변수의 특성을 파악하기 위해 효과적으로 사용될 수 있다.

참고문헌

- (1) John B. Heywood, 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw-Hill.
- (2) N. Watson and M. S. Janota, 1982, "Turbocharging the Internal Combustion Engine," McMillan Press.
- (3) J. G. Hawley, F. J. Wallace, A. Cox, R. W. Horrocks and G. L. Bird, 1999, "Variable geometry turbocharging for lower emissions and improved torque characteristics," IMechE, Vol. 213, Part D.
- (4) Yohan Chi, Jaehoon Cheong, Changho Kim and Kyuhoon Choi, 2002, "Effects of VGT and Injection Parameters on Performance of HSDI Diesel Engine with Common Rail FIE System," SAE Paper, 2002-01-0504.
- (5) Jaehoon Cheong, Sunghwan Cho and Changho Kim, 2000, "Effect of Variable Geometry Turbocharger on HSDI Diesel Engine," Seoul 2000 FISITA Word Automotive Congress.
- (6) Susumu Kohketsu, Kazutoshi Mori, Kenji Sakai and Takazoh Hakozaki, 1997, "EGR Technologies for a Turbocharged and Intercooled Heavy-Duty Diesel Engine," SAE Paper, 970340.
- (7) AVL, 2003, "AVL Boost User's Guide," Version4.0.1.