

금속분말사출성형공법을 이용한 가솔린 터보차저의 웨이스트 게이트 밸브 어셈블리 열 충격 내구 시험

남충우*, 한만배#, 천봉수*, 신재식*, 김종하**, 민두식**

(# 계명대학교 기계자동차공학과, * 계명대학교 기계공학과, ** 한국PIM(주))

Thermal Shock Durability Test of a Gasoline Turbocharger Waste Gate Valve Assembly Manufactured by a Metal Injection Molding

Chungwoo Nam*, Manbae Han**#, Bongsu Chun*, Jaesik Shin*, Jongha Kim***, Doosik Min***

(Received 18 May 2014; received in revised form 24 July 2014; accepted 18 August 2014)

ABSTRACT

A waste gate valve (WGV) assembly for a gasoline turbocharger is typically manufactured by means of precision casting. In this study, however, it was newly manufactured in a more innovative way, metal injection molding (MIM) using Inconel 713C alloy, and its performance was tested in a 1.6L direct injection gasoline engine by a thermal shock durability test that lasted 300 hours, after which the results were compared to those of a precision-cast WGV assembly with regard to the engine intake boost pressure, turbine wheel speed, and transient intake pressure. It was found that the two WGV assemblies showed similar performance levels throughout the durability test.

Key Words : Waste Gate Turbocharger(웨이스트 게이트 터보차저), Gasoline Engine(가솔린 엔진), Waste Gate Valve(웨이스트 게이트 밸브) Metal Injection Molding(금속분말사출성형공법)

1. 서 론

근래에 자동차 산업, 특히 가솔린 엔진에서는 온실가스 배출을 저감하고 연비를 향상시키기 위하여 실린더 내에 연료를 직접 공급하여 연료소비

율을 저감할 수 있는 GDI(gasoline direct injection) 엔진과 터보 과급 등을 이용한 다운사이징에 주목해 왔다.^[1]

GDI 엔진은 기존의 포트 분사식(port fuel injection, PFI) 엔진과 달리 연료를 연소실 내에 직접 분사함으로써 흡기 포트에서 생기는 벽류 현상을 없애고 저부하 운전영역에서의 성층화 연소를 구현함으로써 직접 분사된 연료의 증발 잠열로 인하여 연소실 온도가 기존의 포트 분사식 엔진보다 낮아져 보다 높은 압축비로 운전할 수 있어 열효율과 충전 효율을 높일 수 있으며, 펌핑 손실 및 열손실을 줄임으로써 출력을 높일 수 있다.

* Graduate School of Mechanical Engineering, Keimyung University

Corresponding Author :

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, Corresponding author

E-mail : mbhan2002@kmu.ac.kr

** Headquarter of Research and Development, PIMkorea

연료소모를 줄이기 위해 배기량이 작은 엔진을 탑재하고, 동력성능이 나빠지는 것을 극복하기 위해 터보 과급을 하게 된다. 이는 시내운전과 같은 저 부하 운전영역에서 펌핑 손실을 줄임으로써 연비가 향상하게 되고, 터보 과급을 통한 토크 및 출력의 증대로 고배기량 엔진과 동등 수준의 차량의 동력성능을 확보 할 수 있게 된다. 터보차저는 고속영역에서 터빈 휠이 회전 허용 한도이상으로 회전하게 되기 때문에 터빈부의 과부하 문제를 해결하기 위해 웨이트 게이트 밸브(waste gate valve, WGV)가 장착된다. WGV는 정상 상태에서는 배기가스가 전부 터빈으로 전달 되도록 하다가 과급 압력이 정해진 수준 이상으로 높아지면 배기가스를 우회시켜 터빈이 필요 이상으로 빠르게 회전하지 않도록 한다.[2-7] 또한 WGV는 800~1050°C의 고온의 배기가스에 노출되어 있기 때문에 높은 열 및 잦은 열 변동을 견딜 수 있어야 한다.

기존 WGV 어셈블리는 대개 스테인리스 강 계열을 원재료로 하여 정밀주조공법으로 제작되고 있다.^[8-9] 그러나 원재료 특성상 고온에서의 물성에 한계가 있으며, 조도 및 밀도 미달, 내부 결함으로 인한 불량과 공정 수가 많아 대량 생산 시 생산성 저하가 이루어진다. 그러므로 생산속도는 감소되고, 소재 손실률이 높다. 이러한 정밀주조공법과 비교하여 금속분말사출성형공법(metal injection molding, MIM)은 플라스틱산업의 사출성형기술과 분말야금산업의 금속분말 소결기술의 이점을 융합시킨 공법이다. 장점은 재료의 다양성, 후 가공이 거의 없는 대량생산, 높은 치수정밀도와 내부 결함의 최소화이다. 분말제조기술, 성형기술 및 소결기술의 발전에 따라 저가격의 실현이 가능해져, 최근 OA사무기기, 재봉기, AV기기, 전기기기 등의 복잡형상 부품 등으로 그 용도가 점차 확대되고 있다.

MIM에 의하여 제작된 WGV 어셈블리는 양산 적용을 위하여 다양한 엔진 내구 시험을 통한 성능 평가가 필수적이다. 대표적인 엔진 내구 시험으로는 전 부하 연속 내구 시험과 열 충격 내구 시험 (thermal shock durability test)이 있다. 전 부하 연속 내구 시험은 고속, 고부하 연속 운전에 의한 엔진의 전반적인 강도, 마모, 열화를 평가하

Table 1 Specification of test engine

| | |
|-------------------|----------------------|
| Engine type | In-line 4-Cylinder |
| Valve train | 4-Valve DOHC (CVVT) |
| Displacement | 1,591cc |
| Bore × stroke | 77mm × 85.44 |
| Compression ratio | 9.5:1 |
| Max. power | 150KW @ 6,000rpm |
| Max. torque | 265Nm @ 1750~4500rpm |

Table 2 Specification of engine dynamometer

| | |
|----------------|------------------------------|
| Model | DYTEK-130 |
| Type | Eddy current, load cell type |
| Max. power | 130KW |
| Max. torque | 343Nm |
| Max. rpm | 8,000rpm |
| Cooling system | Water cooling |

는 시험으로 최대 부하상태에서 장시간(300시간) 동안 시험한다. 열 충격 내구 시험은 열 부하 및 냉각수 온도의 급격한 변화(고속/고부하 가열, 저속/저부하 냉각)에 대한 내열 피로강도의 축진 등을 평가하는 시험이다.

본 실험에서는 WGV 어셈블리를 MIM으로 가공한 WGV_MIM와 기존 주조 공법으로 제작된 WGV_BASE를 교환하여 열 충격 내구 시험을 300시간 진행하여 이에 따른 엔진 성능에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

2. 실험장비 및 실험조건

2.1 실험장비의 구성

이 실험에서 사용된 엔진은 1.6L 가솔린 GDI 직렬 4기통 엔진으로 과급기는 배기매니폴드와 일체형인 웨이트 게이트 터보차저를 택하고 있다. 보다 자세한 사항은 Table 1에 나타내었다. 엔진 동력계는 와전류(eddy current) 방식의 수냉식 냉각 방식으로 최대 흡수동력은 130KW이며, 보다 상세한 동력계 제원은 Table 2에 나타내었다. 측정대상 및 센서는 Fig. 1에 나타내었으며, 터보차저의

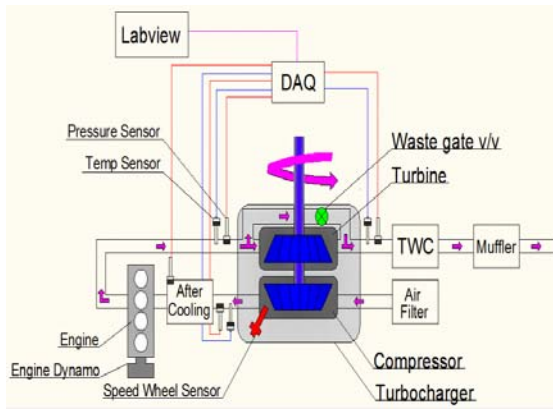


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

부품의 구성은 터빈 로터, 컴프레서 휠, 베어링 하우징으로 구성된다. 컴프레서는 터보차저에서 공기를 압축하여 엔진의 실린더로 보내는 역할을 하며, 터빈은 배기가스로부터 에너지를 얻어 컴프레서를 구동하는 역할을 한다. 온도센서(k-type thermocouple)의 장착위치는 냉각수 입·출구 및 흡기 배기에 장착하였으며, 컴프레서에 터빈스피드 센서를 장착하여 과급기 회전속도를 측정하였고, 터빈 및 컴프레서 입·출구에 압력센서를 장착하여 압력을 측정하였다. 인터쿨러에 장착된 부스트 압력센서 및 각종 센서류 등은 DAQ(data acquisition)를 이용하여 데이터를 수집하였다.

2.2 열 충격 내구 사이클

WGV의 동작은 흡입공기압 (P1)과 배기가스 압력 (P2)의 차이로 결정이 된다. $P1 > P2$ 인 경우 WGV는 닫히고 배기압 P2로 인해 WGV 헤드면은 하중을 받게 된다. $P2 > P1$ 인 경우 WGV가 열리고 배기압을 배출하여 압력을 낮추게 된다. WGV는 터보차저의 파손을 막기 위한 부품으로 높은 내구성 요가된다. 따라서 높은 온도에서 WGV가 반복적으로 열리고 닫히는 열 충격 내구 시험을 실시했다.

이를 위하여 엔진은 무부하 상태에서 5000rpm 까지 엔진회전수를 높이면서 부하를 증대시켜 5000rpm에 도달하였을 때 엔진 부하 70%를 유지

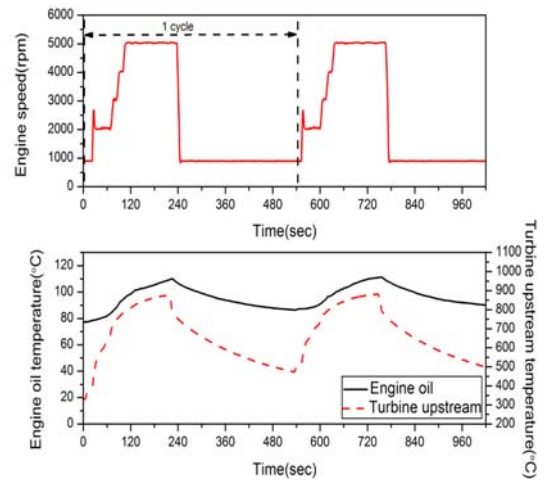


Fig. 2 Engine speed pattern of the durability test cycle, engine oil temperature and turbine upstream exhaust gas temperature

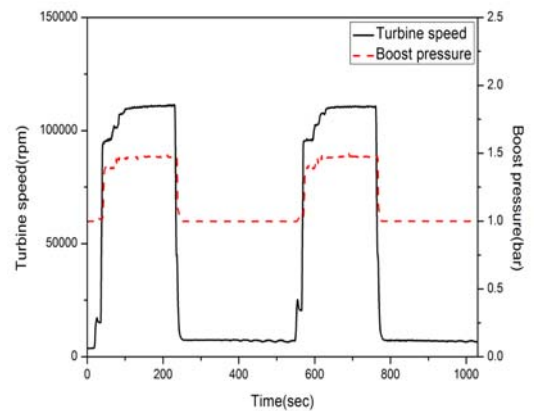


Fig. 3 Turbine speed and boost pressure at the durability test cycle

하였으며, 한 사이클에 약 530초가 소요된다. Fig. 2는 이러한 내구 시험 사이클 운전시 엔진속도의 변화와 이에 따른 터빈 전단의 온도와 엔진 오일 온도 변화를 나타낸다. 엔진 오일 온도는 $90 \pm 30^\circ\text{C}$ 로 유지하였으며, 터빈 전단의 배기가스 온도는 900°C 이하로 유지하였다. 또한 Fig. 3은 내구 사이클에 따른 부스트 압력과 터빈회전수의 변화이다. 부스트 압력은 최대 1.6bar, 터빈회전수는 최대 120,000rpm 이었다.

2.3 MIM WGV 어셈블리

Fig. 4의 WGV 어셈블리는 밸브, 와셔, 레버로 구성되며, Inconel 713C를 이용한 MIM으로 제작한 WGV_MIM이다. WGV 어셈블리 가공 개발 목표 및 개발치는 Table 3과 같다. MIM에 의하여 제작된 WGV_MIM은 경도, 상대밀도, 치수정밀도에서의 기존의 정밀주조공법의 개발목표치를 모두 상회하였다. 경도 측정은 어셈블리 단품 3종 (밸브, 레버, 와셔)을 각각 5개 씩 1 μ m 스케일까지 연마하여 비커스 경도계를 이용하여 측정하였다. 경도 측정결과 단품 3종 모두 정량적 목표인 360Hv 보다 우수한 경도 특성을 보였다. 상대밀도 역시 98% 이상이었으며, 치수정밀도 또한 도면상의 개발목표치 이내를 만족하였다.



Fig. 4 Waste gate valve assembly

Table 3 Specification of the waste gate valve

| | | Target | Development goals |
|----------------------|------------|---------|-------------------|
| Hardness | Valve(Hv) | 405 | 360 |
| | Lever(Hv) | 410 | 360 |
| | Washer(Hv) | 408 | 360 |
| Relative density | Valve(%) | 98.2 | 96 |
| | Lever(%) | 98.4 | 95 |
| | Washer(%) | 98.3 | 97 |
| Dimensional accuracy | Valve(mm) | -0.0052 | ± 0.01 |
| | Lever(mm) | +0.0029 | ± 0.01 |
| | Washer(mm) | +0.0146 | ± 0.015 |

3. 실험결과 및 토론

3.1 WGV 작동 엔진 운전 영역

WGV 내구 시험을 진행하기 위해 앞서 WGV 작동 엔진 운전 영역을 확인하였다. 엔진부하 20%와 40%, 60% 조건에서 엔진회전수에 따른 부스트 압력과 터빈회전수를 조사 하였으며, Fig. 5에 나타내었다. 터빈회전수는 부하 20% 일 때 엔진회전수 5000rpm까지 지속적으로 상승하였고, 부스트 압력 또한 지속적으로 상승하였다. 이로부터 부하 20% 엔진회전수 5000rpm 이하에서는 WGV가 열리지 않는 것으로 판단된다. 부하 40% 조건에서는 3500rpm까지는 부스트 압력이 상승하다가 그 이상의 rpm에서는 부스트 압력이 일정하게 유지되었다. 엔진부하 40%에서는 3500rpm에서 WGV가 열리는 것으로 판단된다. 60% 부하에서는 2500rpm부터 부스트 압력이 일정하게 유지되었다. 이러한 조사 결과로부터 본 실험에서 엔진은 부하가 높을수록 낮은 엔진회전수에서 WGV가 열리는 것을 확인하였다. 그러므로 본 내구 시험은 최대 5000rpm 엔진부하 70% 영역을 유지하므로 WGV는 열려있게 된다. 그 이후 아이들 운전 영역으로 천이되면서 WGV는 닫힌다. 이러한 반복 사이클을 통하여 WGV 개폐가 반복된다.

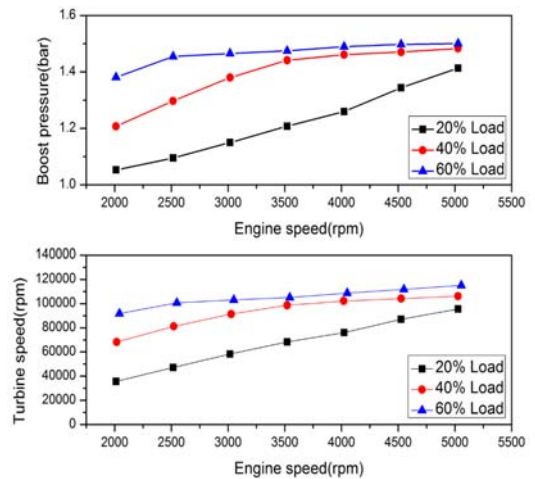


Fig. 5 Boost pressure and turbine speed

3.2 WGV 엔진 내구 성능 평가

내구 시험 300시간 동안 10시간 단위로 내구 사이클 최대 엔진회전수와 최대 부하 정상 상태 영역(5000rpm, 70% 부하)에서 부스트 압력과 최대 터빈회전수를 측정하여 내구 진행 시간에 따른 WGV 어셈블리의 성능을 비교하였다. 기존의 정밀주조공법에 의한 WGV_BASE와 MIM에 의하여 제작한 WGV_MIM 와 성능을 비교하였다. Fig. 6 에서 볼 수 있듯이 WGV_BASE와 WGV_MIM의 최대 부스트 압력은 약 1.6bar이며, 터빈회전수는 약 120,000rpm으로 내구 300시간 동안 비슷한 값을 나타냈다. 구간마다 대기온도 및 습도에 의한 실험 오차 수준의 차이는 존재하지만 전체적인 경향은 실험 오차 수준 내에서 동일하였다. 이로부터 최대 속도, 최대 부하 운전 영역에서의 WGV_MIM 성능이 내구시간 변화에 따른 성능 저감이 없었으며, 또한 기존의 WGV_BASE와 동일한 성능을 보임을 알 수 있었다.

또한 Fig. 7은 내구 사이클 298시간일 때 과도 구간에 대하여 비교한 결과이다. WGV_BASE와 WGV_MIM 어셈블리의 최대 부스트 압력은 1.6bar, 최대 부스트 압력 생성에 도달하는 시간은 약 68초, 최대 터빈회전수는 약 120,000rpm, 최대 터빈회전수에 도달하는 시간은 약 100초로 비슷하게 나타났다. 제동평균유효압력(brake mean effective pressure, BMEP) 또한 WGV_BASE와

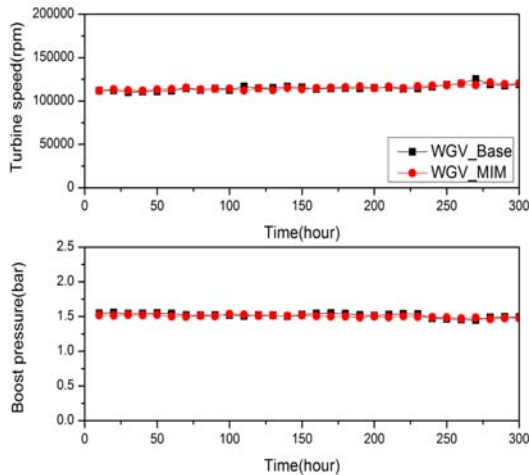


Fig. 6 Turbine speed and boost pressure

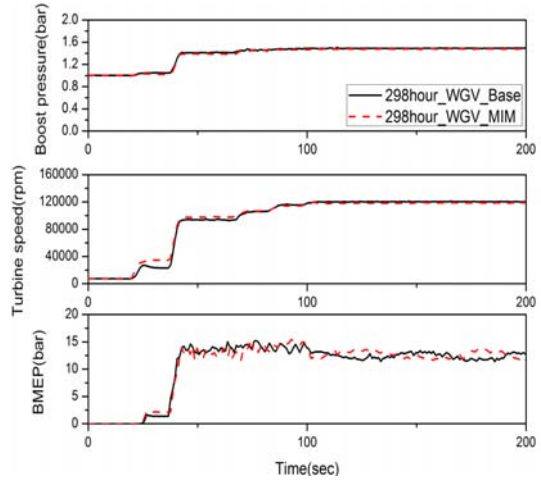


Fig. 7 Boost pressure and turbine speed under 1cycle condition at 298hour

WGV_MIM 어셈블리가 비슷한 경향을 나타냈다. 따라서 열 충격 내구 시험을 통해서 두 WGV 어셈블리의 최대 부스트 압력, 최대 부스트 압력 생성에 도달하는 시간 및 BMEP이 동일한 성능을 나타내는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존 강계열의 주조공법을 이용하여 제작된 WGV 어셈블리와 MIM을 이용한 WGV 어셈블리를 열 충격 내구 시험을 통해 성능을 비교 하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 300시간 내구 전 구간 동안 WGV_BASE와 WGV_MIM의 최대 부스트 압력과 최대 터빈회전수는 동일한 경향을 나타내었다.

298시간일 때 과도 구간에 대한 비교는 최대 부스트 압력 생성에 도달하는 시간과 최대 터빈회전수에 도달하는 시간, BMEP는 동일한 경향을 나타내었다.

3. 300시간의 열 충격 내구 시험 결과, 최대 부스트 압력, 최대 터빈회전수, BMEP이 동일한 경

향을 보이므로 본 연구에서 개발한 WGV_MIM은 기존 주조공법에 의한 WGV_BASE와 동일한 성능을 갖는다고 판단된다.

후기

이 연구는 지식경제부 우수제조기술연구센터사업의 일환으로 수행된 연구결과(No.10039054)로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Zhao. F., Harrington. D. L. and Lai. N., "Automotive Gasoline Direct-Injection Engines", SAE, 2002.
- (2) Heywood. B., "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGRAW-Hill, 1989.
- (3) David. B., Kittelson, "Engine and Nanoparticles A Review", J. of Aerosol Sci., Vol. 29 No. 5-6, pp. 575-588, 1998.
- (4) Taylor. J., Fraser, N. and Wieske. P., "Water Cooled Exhaust Manifold and Full Load EGR Technology Applied to a Downsized Direct Injection Spark Ignition Engine", SAE Int. J. Engines, Vol. 3 No. 1, pp. 225-240, 2010.
- (5) Kirwan. J., Shost. M., Roth. G. and Zizelman. J., "3-Cylinder Turbocharged Gasoline Direct Injection: A High Value Solution for Low CO₂ and NO_x Emissions", SAE Int. J. Engines, Vol. 3 No. 1, pp. 355-371, 2010.
- (6) T. Pauly., S. Franoschek., R. Hoyer and S. Eckhoff, "Cost and Fuel Economy Driven Aftertreatment Solutions for Lean GDI", SAE Technical Paper. 2010-01-0363, 2010.
- (7) Park. S. H., Kim. H. J., Suh. H. K. and Lee. C. S., "Atomization and Spray Characteristics of Bioethanol and Bioethanol Blended Gasoline Fuel Injected through a Direct Injection Gasoline Injector", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 30 No. 6, pp. 1183-1192, 2009.
- (8) Kim. S. W. and Donotzuka., "Actual Status of Metal Injection Molding Technology", J. of KSHT, Vol. 13 No. 2, pp. 126-131, 2000.
- (9) Koo. Y. D., Kil. S. C. and Na. D. B., "Metal Powder Injection Molding", KISTI, pp. 4-34, 2002.