

TiAl 터빈을 적용한 과급 직분식 전기점화 엔진의 과도운전 성능특성

박 찬 수 · 정 진 영 · 배 충 식*

한국과학기술원 기계공학과

Characteristics of Transient Performance in a Turbocharged GDI Engine with TiAl Turbine

Chansoo Park · Jinyoung Jung · Choongsik Bae*

Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea
(Received 31 October 2014 / Revised 10 February 2015 / Accepted 16 February 2015)

Abstract : Turbocharged gasoline direct injection engine is one of promising technologies in the automotive industry. However, reduction in turbo-lag under transient operation is one of important challenging points to improve drivability. Engine transient performance was investigated in a 4-cylinder 2.0 L turbo-gasoline direct injection (T-GDI) engine using Inconel and TiAl (Titanium Aluminide alloy) turbine wheel turbochargers. The TiAl turbocharger performed superior transient boost pressure and torque rises under various engine transient operation conditions. These were mainly due to lower turbine rotational inertia of TiAl turbocharger. The Maximum boost pressure and torque build up were founded in 1500 rpm and 2000 rpm, instant load change from 20% to 100% of pedal position.

Key words : Turbocharger(터보차저), Inconel(인코넬), TiAl(티탄 알루미늄 합금), Transient performance(과도운전 성능), Boost pressure(과급압), Engine torque(엔진토크), Rotational inertia(회전 관성)

Nomenclature

APS : accelerator position sensor
CAD : crank angle degree
CVVT : continuous variable valve timing
DAQ : data acquisition
DOHC : double over head cam
GDI : gasoline direct injection
EC : eddy current
ECU : engine control unit
LET : low end torque
LP : low pressure
rpm : revolution per minute

TC : turbocharger
TiAl : titanium aluminide alloy
VGT : variable geometric turbocharger
WG : waste gate

Subscript

A, B, C : experiment conditions

1. 서 론

화석연료의 고갈로 인한 연료비용 상승문제와 이산화탄소 및 질소 산화물 등의 유해 배기가스의 배출로 인한 환경문제가 차량수송부문에 있어서의 핵심의제로 대두되면서, 전 세계적인 연비 및 배기물 질에 대한 규제가 심해지고 있다. 이에 대한 유망한 해결기술의 하나인 다운사이징 직분식 가솔린 전기

*A part of this paper was presented at the KSAE 2014 Annual Conference and Exhibition

*Corresponding author, E-mail: csbae@kaist.ac.kr

점화 엔진은 기존의 포트 분사식 엔진에 비하여 연료의 실린더 내 직접 분사에 의한 차지쿨링 효과와 작은 배기량을 가지는 엔진의 펌프손실 및 마찰손실의 저감을 통해 연비에서의 이점이 있으며, 터보차저를 이용한 흡기의 과급을 통해 엔진 출력과 토크의 향상을 이룰 수 있는 것으로 알려져 있다.¹⁾

하지만 이로 인해 과거 자연흡기 엔진에서는 문제가 되지 않았던 저속 부분에서의 토크(Low end torque) 저하문제와 포트 분사식 엔진에서는 문제가 되지 않았던 과도운전조건에서의 가속 응답성 지연과 입자상 물질 등의 유해 배기물질 배출문제가 큰 단점으로 지적되고 있다.^{2,3)}

새로운 드라이빙 사이클의 도입과 운전자들의 가속성능에 대한 높은 요구에 따라 이러한 문제점들을 해결하기 위해 현재 다수의 선도 기업 및 연구자들은 직분식 전기점화 엔진에서의 과급기술에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다.

관련 연구동향으로 R. Aymanns 등은 그동안 고려되지 않았던 고전압(48V)을 사용하는 전기적 모터를 이용한 슈퍼차저와 기존의 LP(Low pressure) 터보차저의 2단 과급 및 WG(Waste gate) 제어에 대한 시뮬레이션 결과를 통해 엔진속도 1250 rpm, 부하조건 2 bar BMEP에서 전부하의 과도운전 조건에서 응답성을 기존의 1.8초에서 0.2초로 향상 시키는 연구를 발표한 바 있다.⁴⁾ J. Lotterman 등은 기존의 반경방향 터빈이 아닌 축방향 터빈의 사용 또는 더욱 가벼운 터빈을 사용하여 터보차저 회전체의 회전관성을 줄여 과도응답성을 약 25% 향상시켰다고 보고하였으며,⁵⁾ 정진영 등은 다운사이징 된 2.0L GDI엔진에 기존의 Inconel과 경량 TiAl 재질의 터빈 휠을 사용한 터보차저간 응답성 비교 실험을 통해 회전관성이 작은 TiAl 터빈 휠을 사용한 터보차저의 경우가 2000 rpm에서 엔진 토크 응답성이 약 24% 향상되었다고 발표하였다.⁶⁾ 또한 J. Taylor 등은 직분식 전기점화 엔진의 높은 배기온도로 인해 그동안 사용되지 못했던 VGT(Variable Geometry Turbocharger)의 적용을,⁷⁾ J. Andersen 등은 서로 다른 형상 및 크기의 VGT의 적용에 따라 저속토크 향상 및 과도응답성 개선 정도를 비교 연구하였으며,⁸⁾ Luckmann

등은 더블 엔트리 터빈 하우징의 배기 유동 분리벽 설계에서 터빈의 운전 효율과 엔진 배기관 압력에 의한 실린더간 배기배출 간섭 최소화 사이의 최적화 설계를 통해 저속 토크 발생 엔진 속도를 1130rpm까지 낮추었다고 보고한 바 있다.⁹⁾

식 (1)은 터보차저의 회전 운동에너지의 변화와 터보차저의 회전 가속에 필요한 일을 연결시켜 단순화한 식으로 좌변의 t 는 목표 회전 속도에 도달하기까지 걸리는 시간을 의미하며 우변의 I_p 는 터보차저의 회전관성, P_{accel} 은 가속에 필요한 시간당 일, $P_{turb,isen}$ 와 $P_{comp,isen}$ 은 각각 터빈과 컴프레서가 목표 회전속도에 도달하기까지 필요한 이론적 시간당의 일, P_{brg} 는 베어링에서 소모되는 시간당 일, ω 는 회전 각속도 그리고 η_{turb} 와 η_{comp} 는 터빈과 컴프레서의 운전 효율을 나타낸다. 즉, 목표 회전속도가 정해져 있고 이를 달성하기 위한 터빈과 컴프레서 그리고 손실의 일이 정해져 있다고 할 때, 터보차저의 과급에 걸리는 시간은 터보차저의 회전관성이 작을수록, 그리고 터빈과 컴프레서의 효율이 클수록 작아지게 된다.⁵⁾ 회전관성의 경우 과도응답시간에 직접적인 영향이 있으며, 터빈 효율의 경우 과도운전 초기의 감소된 배기 유량에 의해 감소하여 과도응답성 저하에 영향을 미치게 된다. 즉, 터보차저의 회전관성을 감소시켜 과도응답시간을 단축시키는 것이 빠른 과급압 형성을 통해 엔진 배기의 유량을 증가시켜 터빈의 효율 측면에서도 도움이 되며, 터빈 운전 효율 증가를 통해 다시 과도응답성이 향상되는 결과를 낳게 된다.¹⁰⁾ 이에 따라 본 연구에서는 다운사이징 기술이 적용된 과급 직분식 엔진에 대하여 다양한 가속 조건에서 터빈 휠 재질의 차이에 의해 회전관성이 다른 Inconel 터빈 휠 터보차저와 TiAl(Titanium Aluminide alloy) 터빈 휠 터보차저의 과도응답성 비교연구를 수행하여 터보차저의 응답성 지연에 대한 이해를 얻고자 하였다.

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{1}{2} \frac{I_p(\omega_2^2 - \omega_1^2)}{(P_{accel})} \\
 &= \frac{1}{2} \frac{I_p(\omega_2^2 - \omega_1^2)}{(P_{turb,isen} \times \eta_{turb} - \frac{P_{comp,isen}}{\eta_{comp}} - P_{brg})} \quad (1)
 \end{aligned}$$

2. 실험 장치 및 실험 조건

2.1 실험 장치

본 실험에 사용된 대상 엔진은 직렬 4기통 2.0 L 과급 직분식 전기점화 엔진(Turbocharged Gasoline Direct injection (T-GDi) engine, Hyundai Theta II T-GDi)으로 주요 제원은 Table 1과 같다. 본 실험 엔진에 장착된 과급기는 전자식 WG가 장착된 Inconel 과 TiAl 재질의 터빈 휠을 장착한 트윈스크롤 터보차저로 같은 실험 조건에 대하여 두 터보차저의 과도운전 특성을 비교 분석하였다.¹¹⁾

두 터보차저의 제원은 Table 2와 같으며, 터빈 휠의 재질을 제외한 다른 제품 사양은 동일하게 설계되었다. 두 터보차저 모두 950°C 온도에서도 정상적으로 작동할 수 있도록 내열설계를 갖추었으며, Table 2에서 확인할 수 있는 것과 같이 TiAl 재질의 터빈 휠이 Inconel 대비 최대중량이 약 26% 정도 가벼운 것을 확인할 수 있고, 이에 따라 두 터보차저간 회전관성이 차이를 보임을 확인할 수 있다.

센서들을 통해 취득한 온도, 압력, 그리고 터빈 휠 회전속도 정보는 측정 주파수 140 KHz, 분해능 16 bit의 DAQ(Data Acquisition) 보드를 통해 컴퓨터로 전달하여 NI(National Instruments)사의 DASYlab의

Table 1 Specification of test engine

Engine type	In-line 4 Cylinder
Displacement	1,998 cc
Bore × Stroke	86 mm × 86 mm
Compression ratio	9.5
Valvetrain	4-valve DOHC (CVVT)
Max power	278 PS @ 6,000 rpm
Max torque	37.2 kgfm @ 1,750 ~ 4,500 rpm

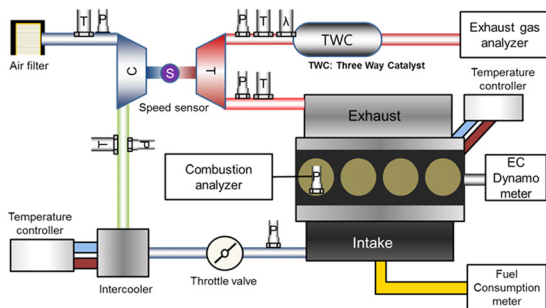


Fig. 1 Experimental apparatus and sensor location⁶⁾

Table 2 Specification of test turbine

	Inconel TC	TiAl TC
Density	8,190 kg/m ³	4,430 kg/m ³
Weight	0.202 kg	0.149 kg
Rotational inertia	261e-7 kg m ²	198e-7 kg m ²

연구실 자체 제작 프로그램을 통해 1 CAD 단위로 저장 및 분석 하였다. 또한 가속페달 위치(accel position)에 해당되는 가속 신호를 ECU(Engine Control Unit)에 DAQ의 아날로그 입력을 통해 입력하여 엔진의 부하를 조절하였다. 그리고 EC(Eddy Current) 다이내모미터를 사용하여 엔진 속도를 조절하였다.

2.2 실험 조건

실험조건은 실차에서의 주요 엔진 속도인 1500rpm, 2000rpm에서 운전자의 다양한 가속조건을 모사하기 위해 가속 페달 위치의 20%와 40%의 위치를 엔진 저부하 상태를 대표하는 값으로 두고 80%와 100%를 고부하 상태를 대표하는 값으로 설정하여 저부하에서 고부하로의 순간적인 부하증가(A), 1초에 걸친 부하증가(B), 2초에 걸친 부하증가(C)의 3단계의 부하 증가율에 대하여 두 터보차저의 과급압, 토크, 터보차저 회전속도를 비교하는 방식으로 진행하였다. Table 3은 위의 실험 조건을 정리한 것이다.

Table 3 Experiment conditions

Engine speed	1500 rpm and 2000 rpm
Transient condition A	instant load increase, from 20% to 80 & 100%, from 40% to 80 & 100% of pedal position
Transient condition B	ramp load increase for 1 second, from 20% to 80 & 100%, from 40% to 80 & 100% of pedal position
Transient condition C	ramp load increase for 2 seconds, from 20% to 80 & 100%, from 40% to 80 & 100% of pedal position

3. 실험 결과 및 토의

3.1 터보차저간 과도운전 성능 비교

Fig. 2는 2000rpm, 계단형태의 순간적인 부하 증가(20-100%)에 따른 엔진 토크, 과급압 그리고 터빈의 회전 속도를 나타낸다. Inconel 터보차저 대비

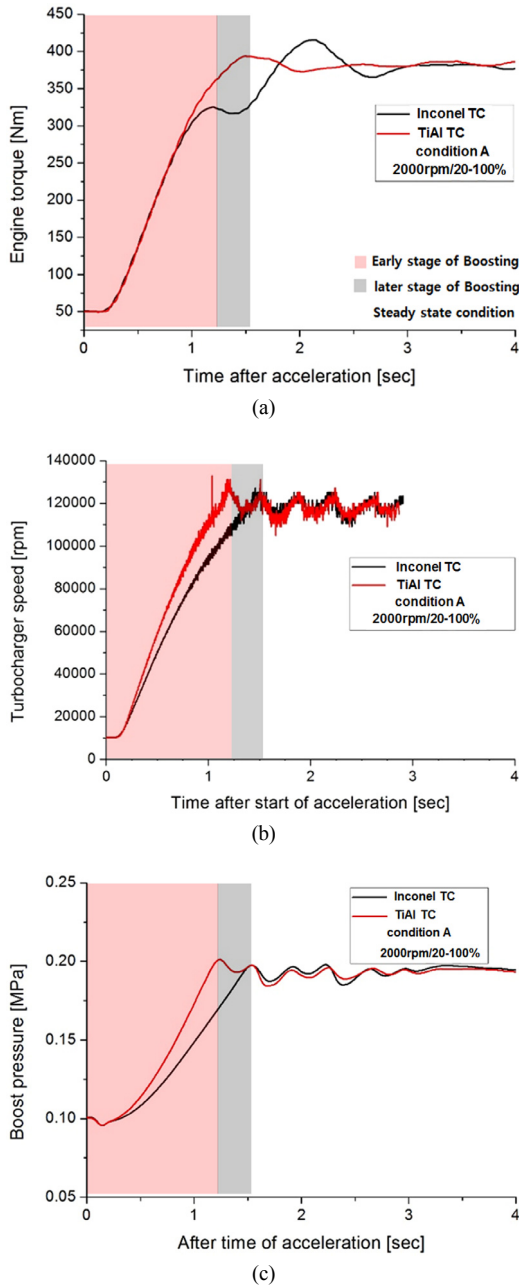


Fig. 2 Transient response characteristics of Inconel and TiAl TC at 2000 rpm, transient condition A, load change 20-100%, (a) Torque, (b) Boost pressure, (c) TC speed

TiAl 터보차저의 과도응답 성능이 우수한 것을 확인할 수 있으며, TiAl의 경우가 각각 90% 과급압 형성 시간이 약 0.253초 18.9%, 90% 토크 형성 시간이 약 0.49초 27.7%, 터빈 휠 회전 속도가 정상상태 거동에

도달하는 시간을 기준으로 0.255초 17.9% 향상됨을 본 조건에서 확인할 수 있었다.

이는 TiAl 터보차저의 작은 회전관성에 의해 엔진 부하 증가 초기의 적은 유량에서부터 Inconel 대비 TiAl 터빈이 빠르게 회전하여 실린더내로 들어오는 흡기의 과급량이 많아지고 이에 따라 이론 공연비로 운전되는 전기 점화식 엔진의 특성상 실린더내로 분사되는 연료의 양이 많아져 터보차저 터빈 전단의 배기유량과 배기 온도가 높아졌기 때문이며, 또한 이에 따라 TiAl 터보차저 터빈이 더욱 효율이 높은 영역에서 운전되었기 때문이다.

최대 과급압의 경우 두 터보차저간 차이는 2% 내외로 미미하였다. 이는 식 (2)와 식 (3)에서와 같이 과도운전조건에 있어서는 두 터보차저간 회전관성 (I_{TC})의 차이에 의해 두 터보차저의 회전속도 (N_{TC})의 상승속도에서 차이가 발생하지만, 정상상태 운전의 경우 두 터빈간 형상의 크기의 차이가 없기 때문에 같은 회전속도를 보이고, 같은 전 후단의 압력 팽창비 (π_t)를 가지기 때문에 동일한 과급압 성능을 보인 것으로 판단된다.¹⁰⁾

$$\frac{dN_{TC}}{dt} = \frac{60}{2\pi I_{TC} N_{TC}} (P_T - P_C - P_f) \quad (2)$$

$$P_T = m_T \eta_T c_p T_3 \left(1 - \pi_t^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right) \quad (3)$$

where P_T : Effective turbine work

과급 초기의 과급압 형성에 있어서 TiAl 터보차저가 Inconel 대비 높은 과급압을 형성 함에도 불구하고 엔진 토크에서 큰 차이가 없는 이유는 Fig. 3에서와 같이 TiAl의 우수한 과급압 형성에 따른 실린더 내 노킹 방지를 위해 과급압 형성 후 0.581초에서 0.875초 사이(11 ~ 16 사이클)의 점화시기 지각에 따라 연소상으로 정의된 최대 열방출량의 50%를 나타내는 CA 50이 지각되고 연소기간이 증가했기 때문으로 판단되며, 과급 후기의 경우 Inconel 터보차저가 TiAl 터보차저보다 동일시기 대비 더욱 낮은 과급압을 보였으며, 이에 따른 연료의 분사량의 차이에 의하여 엔진 토크에서의 차이를 보였다. 이후의 정상 상태의 토크 특성은 두 터보차저 모두 WG 작동에 의해 일정한 값으로 수렴하게 된다.

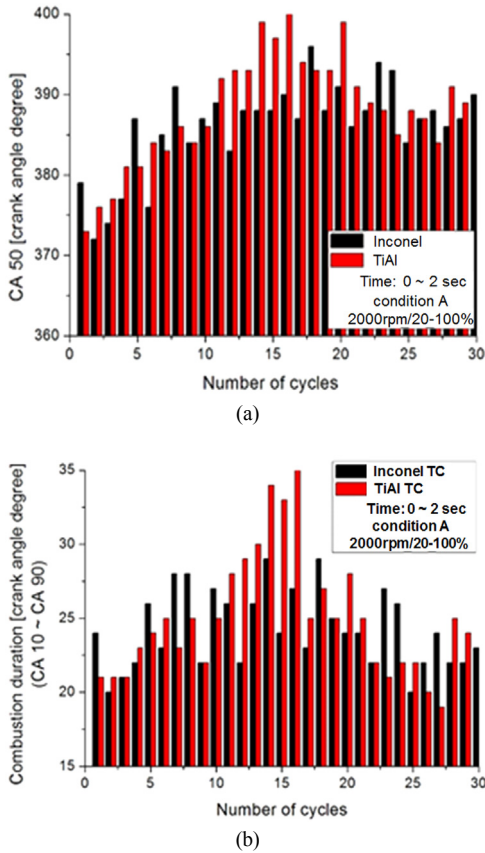


Fig. 3 (a) Combustion phase and (b) Combustion duration of transient operation at 2000 rpm, transient condition A, load change 20-100%

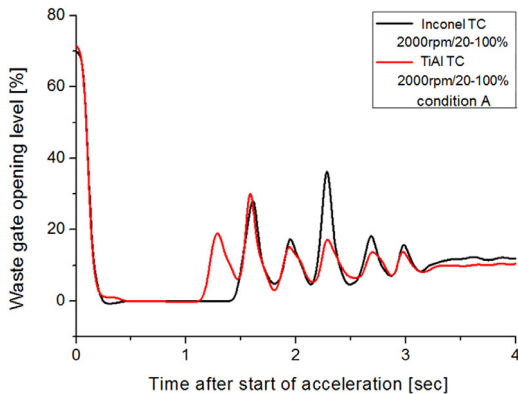


Fig. 4 Wastegate opening timings of Inconel and TiAl TC at 2000 rpm instant load change 20-100%

Fig. 4는 WG의 거동을 나타낸 것이다. TiAl 터보차저의 WG가 더욱 빨리 열리는 이유는 앞서 설명한 것과 같이 TiAl 터보차저의 빠른 과급압 형성 인

해 과급압이 ECU 내에 미리 지정된 값에 먼저 도달하였기 때문이며, 이후 응답성이 느린 Inconel 터보차저의 WG 열림을 확인할 수 있다. WG의 열림 그래프 상의 진동은 과급압의 오버 슈트(Overshoot) 및 연료 분사량의 변화에 따라 WG가 PID(proportional-integral-differentiative) 제어 방식으로 작동했기 때문이다.

3.2 운전조건 변화에 따른 터보차저간 과도운전 성능 비교

3.2.1 부하의 영향

Table 4와 Fig. 5는 엔진속도 2000 rpm, transient condition A에서 TiAl 터보차저와 Inconel 터보차저의 과급압 달성시간과 TiAl 터보차저의 응답성 향상 결과를 부하의 변화에 따라 나타낸 것이다.

결과에서 90% 과급압 달성 시간은 부하의 상승 정도가 큰 경우가 작은 경우에 비해 두 터보차저 모두 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이는 부하의 상승

Table 4 comparison of transient boost pressure response time of TiAl and Inconel TC at 2000 rpm, transient condition A

Load change (APS %)	Inconel	TiAl	Improve (%)
20% - 80%	1.0924	0.9217	15.6
40% - 80%	1.05	0.9224	12.2
20% - 100%	1.3381	1.085	18.9
40% - 100%	1.2702	1.0362	18.4

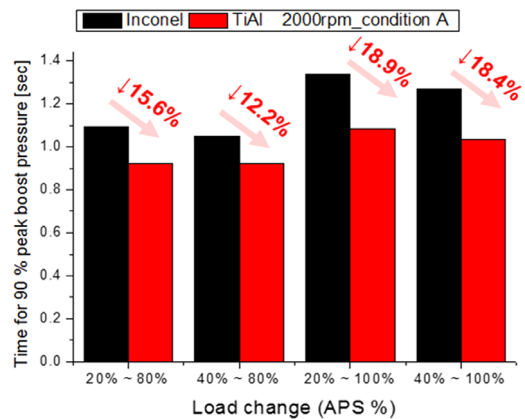


Fig. 5 90% boost pressure rise time comparison between TiAl and Inconel TC by varying load condition at 2000 rpm

Table 5 Improved transient torque response time of TiAl compare to Inconel TC at 2000 rpm

Load change APS (%)	A (%)	B (%)	C (%)
20% - 80%	3.9	7.96	8
40% - 80%	16.9	17.6	3.7
20% - 100%	27.7	12	9.1
40% - 100%	14.2	19.2	9.1

폭이 큰 경우가 상승 폭이 작은 경우에 비해 터보차저가 달성해야 할 과급압의 상승량이 더 많기 때문이다.

두 터보차저간 과급압의 응답성 차이에서는 APS (Accelerator position sensor) 기준으로 부하의 상승량이 가장 큰 20% - 100%의 경우가 가장 큰 응답성 향상을 보였다. 이는 부하의 상승량이 큰 경우가 상승량이 작은 경우에 비해 응답성 차이의 누적 정도가 크기 때문으로 생각된다. 그리고 부하의 상승량이 동일한 20% - 80% 보다 40% - 100% 조건의 경우에서 응답성의 차이가 커지는 이유는 부하가 매우 낮은 운전조건에서부터 운전되는 20% - 80%의 경우에는 두 터보차저 모두 효율적인 영역에서 운전되지 못하는 영역이 많기 때문이며, 과급 자체가 시작되지 않는 영역이 많이 포함되어 있어 경량 TiAl 터보차저의 이점이 발휘되지 못하기 때문으로 생각된다.

엔진 토크는 모든 부하 상승 조건에서 TiAl 터보차저가 Inconel 터보차저에 비해 우수한 과도응답성 향상을 보였지만 부하 상승에 대한 경향성을 뚜렷하게 확인할 수 없었다. 이는 과급압 증가에 따른 점

화시기 지각 및 연료 과분사 등에 따른 영향으로 생각된다.

3.2.2 엔진 속도(rpm)의 영향

Fig. 6 및 Fig. 7 그리고 Table 6에서 엔진 속도의 증가에 따라 두 터보차저 모두 과급압 및 토크의 과도응답성이 향상됨을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 6에서와 같이 엔진 속도의 증가에 따라 엔진내로 유입되는 흡기의 양이 증가되고 이에 따라 엔진 내로 분사되는 연료의 양이 증가됨으로 인해 터빈 전단의 배기 유량 및 배기 온도가 컸기 때문으로 생각된다. 하지만 엔진 속도의 증가에 따른 두 터보차저간 응답성 개선 정도의 차이는 오히려 저속 조건 경우가 더 컸는데, 이는 터보 차저의 효율이 좋지 않은 저

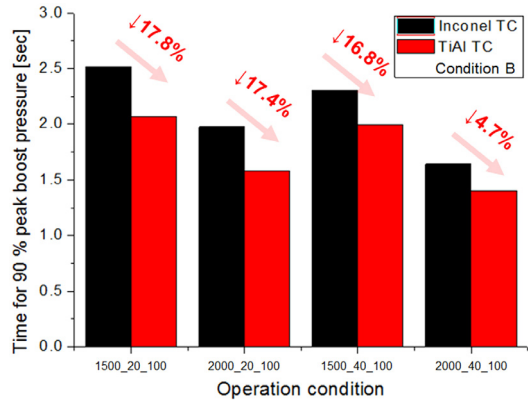


Fig. 6 90% boost pressure rise time comparison between TiAl and Inconel TC by varying speed (rpm) condition

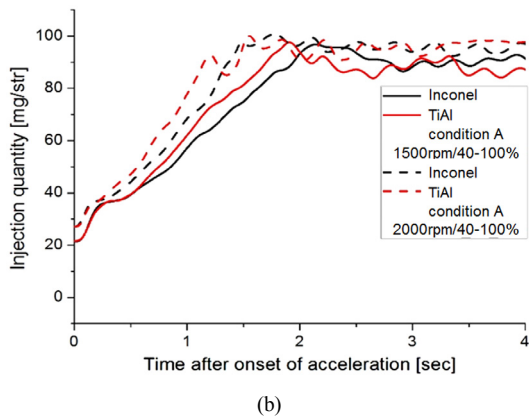
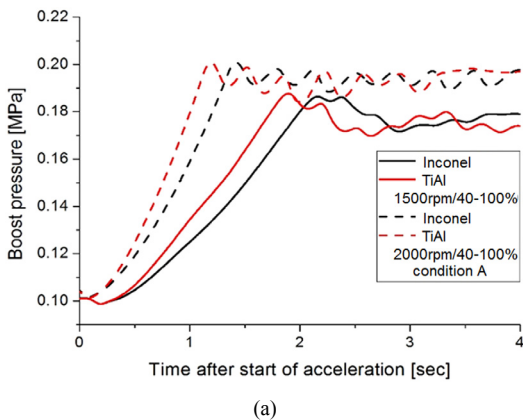


Fig. 7 (a) Injection quantity, (b) Boost pressure comparison at 1500 rpm and 2000 rpm, transient condition A, load change 40-100%

Table 6 Improved transient boost pressure response time of TiAl compare to Inconel TC by varying engine speed

Engine speed (rpm), load condition (APS %)	Condition B	
	sec	%
1500 rpm, 20% - 100%	0.449	17.8
2000 rpm, 20% - 100%	0.344	17.4
1500 rpm, 40% - 100%	0.388	16.8
2000 rpm, 40% - 100%	0.241	14.7

유량 영역에서 TiAl터빈의 작은 회전관성으로 인해 TiAl 터보차저가 더욱 높은 효율로 작동되어 터빈의 회전속도가 빠르게 상승하였기 때문으로 생각된다.

3.2.3 가속 소요시간의 영향

마지막으로 Fig. 8과 Fig. 9에서와 같이 부하의 가속시간이 작은 조건일수록 두 터보차저 모두 과도운전 응답성이 향상됨을 확인할 수 있다. 이는 단순히 가속 신호를 입력한 시간이 짧았기 때문이다. 그리고 대부분의 조건에서 두 터보차저간 차이 역시 부하의 가속시간이 감소함에 따라 증가함을 확인할 수 있다. 이 또한 앞서 설명한 것과 같이 TiAl 터보차저의 경우가 회전관성에 의한 손실이 적어 터보차저의 회전 속도를 빠르게 상승 시켰기 때문이며, 특히 Fig. 9의 (b)의 결과에서 보듯이 느린 부하 상승조건에서는 빠른 부하 상승조건에 비해 상대적으로 Inconel 터보차저가 느린 응답성에 의한 회전 속도 상승 지연을 회복할 시간이 길어 두 터보차저간 회전속도 상승의 차이가 적은 것이 그 원인으로 생각된다.

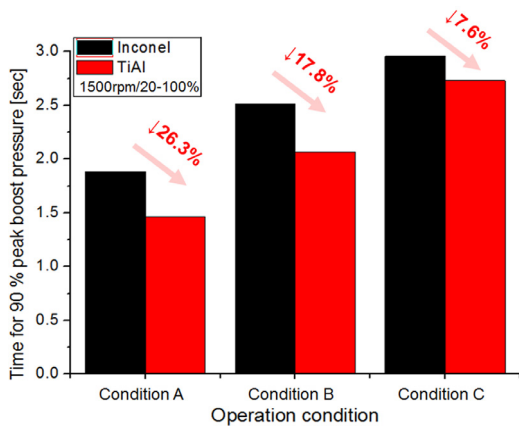


Fig. 8 90% boost pressure rise time comparison between TiAl and Inconel TC by varying transient load change rate condition

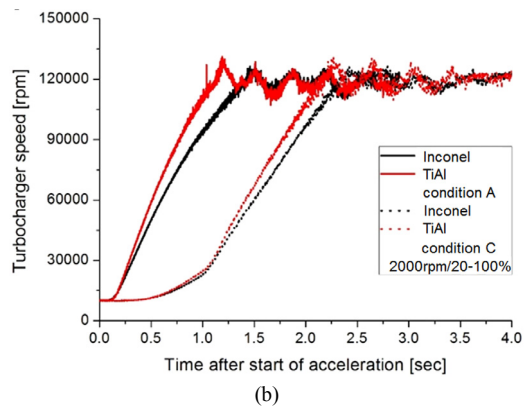
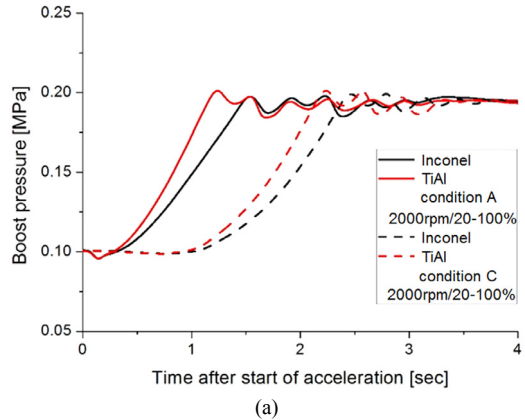


Fig. 9 (a) Boost pressure rise at transient condition A and C, load change 20-100% (b) Turbocharger speed rise at transient condition A and C, load change 20-100%

4. 결론

다운사이징 2.0 L 직분식 과급 전기점화 엔진에서 기존에 사용되었던 Inconel 터보차저와 TiAl 터보차저의 과도운전조건에서 과급압 및 토크의 응답 특성을 비교 분석하였다.

- 1) 모든 가속 조건에서 TiAl 터보차저의 과급압 및 토크의 과도응답성이 Inconel에 비해 우수 하였다. 이는 TiAl 터보차저의 터빈 휠의 회전 관성이 Inconel에 비해 작았기 때문이다.
- 2) TiAl 터보차저의 빠른 과급압 형성에도 불구하고 과급 초기의 엔진 토크에서의 차이가 없는 이유는 TiAl 터보차저의 빠른 과급압 형성에 따라 엔진 내 노킹 방지를 위해 점화 시기가 지각되면서 연소상이 지각되고 연소기간이 길어졌기 때문으로 생각된다. 과급 후기의 경우 두 터보차저

간 과급압의 차이가 커짐에 따라 연료 분사량의 차이가 커짐으로 인한 토크 차이가 발생하였기 때문이며, 이후 WG 작동에 의해 동일한 정상상태 토크로 귀결됨을 확인할 수 있다.

- 3) 부하의 상승량 및 최대부하의 크기, 엔진 속도 (rpm), 부하의 가속시간에 따라 두 터보차저간 과급압에서의 과도응답성 항상 정도의 차이는 대체적으로 부하의 상승량이 크고 최소부하가 큰 경우, 엔진속도는 작은 경우, 부하의 가속시간이 짧은 경우에 컷으며, 이는 TiAl 터보차저의 회전 관성에 의한 손실이 작고, 모든 운전영역에서 Inconel 대비 터빈효율이 우수했기 때문에 생각된다. 토크 응답성은 모든 운전 조건에서 TiAl 터보차저의 경우가 우수하였지만 점화시기의 지각 및 연료 과분사, WG 작동 등으로 인해 그 경향성을 명확히 확인할 수 없었다.
- 4) 향후 TiAl 터보차저의 빠른 응답성으로 인해 발생하는 과급압 및 엔진 토크의 오버슛에 의한 운전성 하락, 빠른 과급압 형성에 따른 연료 과분사 및 연소상 지각에 따른 연비 하락 문제들에 대한 정량적, 정성적 연구가 필요할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 미쓰비시 중공업의 기술적, 금전적 지원 하에 수행되었습니다.

References

- 1) D. Petitjean, L. Bernardini, C. Middlemass and S. Shahed, "Advanced Gasoline Engine Turbocharging Technology for Fuel Economy Improvements," SAE 2004-01-0988, 2004.
- 2) P. Whitaker, P. Kapus, M. Ogris and P. Hollerer, "Measures to Reduce Particulate Emissions from Gasoline DI Engines," SAE Int. J. Engines, Vol.4, No.1, pp.1498-1512, 2011.
- 3) W. Bandel, G. Fraidl, P. Kapus, H. Sikinger and C. N. Cowland, "The Turbocharged GDI Engine: Boosted Synergies for High Fuel Economy Plus Ultra-low Emission," SAE 2006-01-1266, 2006.
- 4) R. Aymanns, T. Uhlmann, C. Nebbia and T. Plum, "Electric Supercharging New Opportunities with Higher System Voltage," MTZ, Vol.75, No.7-8, pp.4-11, 2014.
- 5) J. Lotterman, V. Kares, D. Jeckel and P. D. Martino, "New Turbocharger Concept for Gasoline Engines," MTZ, Vol.73, No.6, pp.54-58, 2012.
- 6) J. Jung, H. Oh and C. Bae, "Characteristics of Turbocharger Equipped with TiAl Turbine Wheel in Downsizing GDI Engine," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.34-40, 2013.
- 7) J. Taylor, N. Fraser and P. Wieske, "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.
- 8) J. Andersen, E. Karlsson and A. Gawell, "Variable Turbine Geometry on SI Engines," SAE 2006-01-0020, 2006.
- 9) D. Luckmann, T. Uhlmann, H. Kindl and S. Pischinger, "Separation in Double Entry Housing at Boosted Gasoline Engines," MTZ, Vol.74, No.10, pp.4-9, 2013.
- 10) S. Park, T. Matsumoto and N. Oda, "Numerical Analysis of Turbocharger Response Delay Mechanism," SAE 2010-01-1226, 2010.
- 11) C. Park, J. Jung and C. Bae, "Characteristics of Transient Performance in a Turbocharged GDI Engine with TiAl Turbine," KSAE Annual Conference Proceedings, pp.83-84, 2014.