

자동차용 스크류형 과급기의 제어성능에 관한 연구

배재일^{*1)} · 배신철²⁾

단국대학교 대학원^{*1)} · 단국대학교 기계공학과²⁾

The Study on the Control Performance of a Screw Type Super-charger for Automotive Use

Jaell Bae^{*1)} · SinChul Bae²⁾

^{*1)}Graduate School, Dankook University, Seoul 140-714, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Dankook University, Seoul 140-714, Korea

(Received 22 July 2003 / Accepted 3 September 2003)

Abstract : Boosting of engine power by using Turbo- or Super-charger is a solution to comply with CO₂-regulation in Europe. Turbo-charger is now playing a major role in the field of charging system thank to its technical advantages such as no demand of operation power from engine. A mechanically driven Super-charger, however, is now popular due to quick speed response to change of the driving mode - high engine torque even at low engine speed. Since Super-charger needs operation power from engine, it is difficult to improve its relatively higher fuel consumption than that of Turbo-charger. This negative point is still an obstacle to the wide use of Super-charger. This study aims to develop power control concept to achieve the minimization of operation power when it is not necessary to charge at idling or part load driving condition. A screw type Super-charger was modified in design partially and adapted an internal bypass valve and a bypass tube to control charging pressure at part load. The various control concepts show a possibility to reduce operation power of Super-charger and result in improvement of fuel consumption.

Key words : Screw type super-charger(스크류형 과급기), Inlet throttle body(흡기 스톱을 바디), External bypass valve(외부 바이패스 밸브), Internal bypass valve(내부 바이패스 밸브)

Nomenclature

EBV : external bypass valve
IBV : internal bypass valve
 n_M : engine speed (rpm)
 n_{SC} : supercharger speed (rpm)
 P_i : inlet pressure (kPa)
 P_o : outlet pressure (kPa)
 P_d : discharge pressure (kPa)
TB : inlet throttle body

1. 서론

엔진으로 흡입되는 공기량의 밀도를 증가시킴으로써 엔진의 출력을 향상시킬 수 있는 과급의 기술이 오늘날 엔진의 Down sizing을 대표하는 한 수단으로 널리 사용되고 있다. 과급기로는 대기로 방출되는 배기가스의 열에너지를 이용하여 구동되는 터보차저가 대표적으로 널리 사용되고 있다. 하지만, 자동차용 특히 승용차일 경우, 승용차의 운행구간이 대부분 중·저속영역인 시내주행이므로 터보차저의 경우 이러한 중·저속구간에서 낮은 과급압으로 인하여 엔진의 출력저하 및 가속응답성이 지연

*To whom correspondence should be addressed.
baejaeil@kefico.co.kr

되는 현상이 발생한다. 이러한 현상을 개선키 위하여 Variable Geometry Turbine Type을 개발, 양산하고 있으나 터보차저의 구동원리 특성상 여전히 그 단점은 일부 존재하고 있다. 따라서 최근에는 전기·전자식 터보차저의 개발을 통하여 단점을 완전히 보완코자 하지만 비용 측면에서 불리한 점을 안고 있다.¹⁻³⁾

중·저속구간에서 출력 향상 및 빠른 속도 응답에 대한 요구에 따라 Volkswagen은 G-Lader라고 하는 기계식 과급기를 개발하였고, Daimler-Crysler (Mercedes Benz)는 Eaton사의 3엽식 루츠형(roots type) 수퍼차저를 현재 가솔린 엔진의 저배기량에서 고배기량까지 광범위하게 탑재하고 있다.^{4,5)} 또한 Mazda의 Miller Cycle Engine에서는 Lysholm식의 스크류형(screw type) 슈퍼차저를 적용하고 있는 등 많은 자동차 제조사들이 터보차저와 함께 수퍼차저를 사용하고 있다. 하지만 수퍼차저의 구동력이 엔진구동의 부하로 작용하여 터보차저에 비해 연비면에서 불리한 점은 여전히 개선이 요구되고 있는 실정이다.⁶⁻⁸⁾

이러한 단점을 보완하고자 본 연구에서는 우선 엔진 속도와 일정한 비율로 구동되는 기계식 과급기(스크류 타입)의 구동력을 최소화시키기 위해 엔진에서 과급이 필요할 때와 필요하지 않을 때를 나누어서 과급기의 압축과정에서 소요되는 구동력을 변화시켰다. 이와 같은 실험을 통해 시내주행에서 많이 발생하는 엔진의 무부하(idling) 및 부분부하(part load)를 제어함으로써 연비 향상의 목적을 달성할 수 있음을 알 수 있었다.

2. 스크류 과급기의 제어원리 및 방법

2.1 부분부하 제어의 필요성

Fig. 1은 엔진과 과급기의 회전수의 변화에 따른 공기 유량과 과급 압력의 상관관계를 나타낸 것이다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 터보차저의 경우 엔진의 저속시 낮은 과급압 때문에 가속 응답성이 떨어지는데 비하여 저속에서부터 고속에 이르기까지 과급압의 변화가 크지 않는 수퍼차저의 가속 응답성은 상대적으로 우수하다.⁴⁾

Fig. 2는 본 연구의 목적으로 사용한 엔진 (Table 2

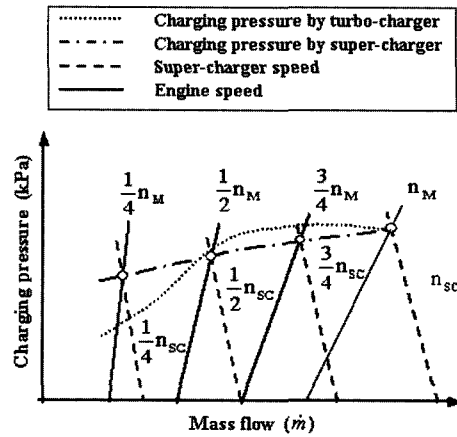


Fig. 1 Relationship of air quantity between engine and super-charger and charging pressure curve at WOT condition

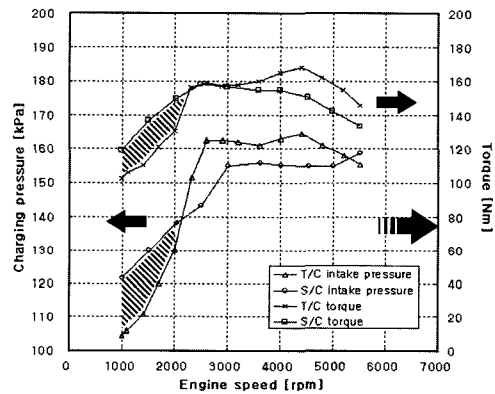


Fig. 2 Comparison of charging pressure and engine torque between with super-charger and with turbocharger at WOT condition

참조)의 회전수 변화에 따라 터보차저와 수퍼차저를 장착하였을 때의 전개 (Wide Open Throttle, WOT) 성능과 흡기 압력의 비교를 나타낸 것이다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 터보차저는 중·저속 구간인 2500rpm이하 영역에서 낮은 과급압 때문에 수퍼차저에 비하여 토크가 떨어지는 것을 알 수 있다.

하지만 출력, 연비 및 배기가스가 전자제어에 의해 완전연소영역($\lambda=1$)에서 운행되고 있는 가솔린 엔진의 경우, 엔진으로 유입되는 공기량에 비례하여 연료가 분사되기 때문에 공회전(idling), 감속 또는 서행 조건과 같이 과급이 필요하지 않은 운전상태에서 수퍼차저에 의한 높은 과급압은 오히려 연비를 나쁘게 하고 있다. 이를 해결하기 위한 방법으

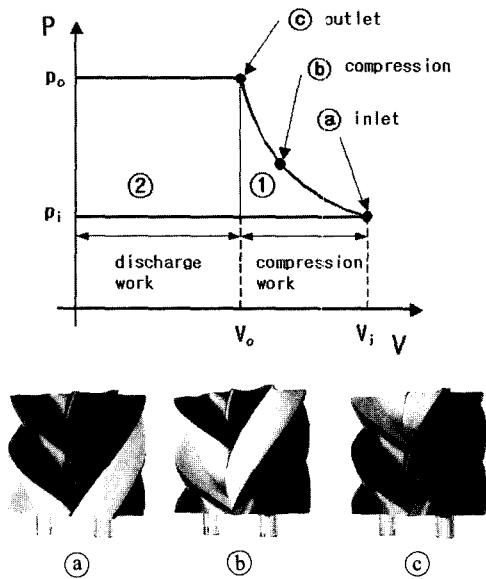


Fig. 3 Pressure and volume curve of screw type supercharger

로서 수퍼차저에 의해 송출되는 압축 공기량을 감소시킴으로써 연료의 분사량을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 과급기의 소요 구동력도 줄일 수 있다.

스크류형 과급기의 구동력은 Fig. 3과 같이 압축 일(compression work)과 송출일(discharge work)로 이루어진다. 두가지 일의 크기를 최소화함으로써 스크류형 과급기의 구동력을 최소화시킬 수 있다.

스크류형 과급기의 구동력(adiabatic compression work)은 식 (1)과 같이 표시되어진다.

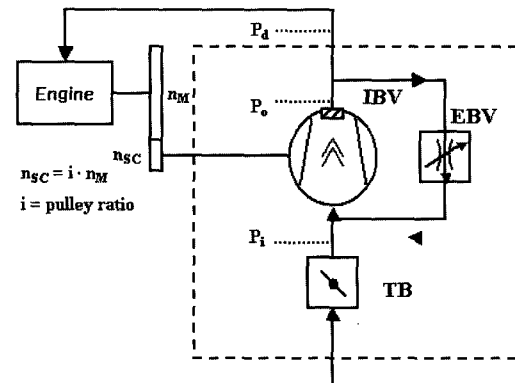
$$W = \int_{P_i}^{P_o} V dp$$

$$= \frac{k}{k-1} P_i V_i \left(\left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) + (P_o - P_i) V_o \quad (1)$$

여기서, 우변 첫째항은 압축일로 Fig. 3의 ① 면적에 해당하고 둘째항은 송출일로 ② 면적에 해당한다. 식 (1)에서 구동력은 압력(Pi, Po)과 체적(Vi, Vo)의 함수로서 표시되어있지만 스크류 과급기의 설계에 따라 흡입체적(Vi)과 토출체적(Vo)의 크기가 결정되어 있어, 결국 흡입압력(Pi)과 토출압력(Po) 변화가 구동력에 영향을 미치게 된다.

2.2 제어 방법

본 논문의 제어방법을 구현하기 위한 실험장치의



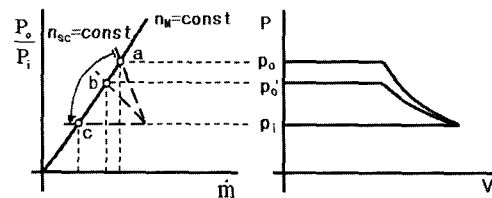
IBV : Internal Bypass Valve
EBV : External Bypass Valve
TB : Inlet Throttle Body

Fig. 4 System concept for a part load control

개념을 Fig. 4에 나타내었다. 장치의 구성에서는 흡입압 Pi를 변화하기 위해 흡기 스로틀 바디(Inlet Throttle Body, TB)와 송출압을 낮추기 위한 외부 바이패스 밸브(External Bypass Valve, EBV)를 설치하였고 토출압(Po)을 변화시키기 위하여 스크류형 과급기의 설계를 일부 변경해 내부 바이패스 밸브 (Internal Bypass Valve, IBV)를 추가하였다. 수퍼차저의 과급압을 제어하기 위해 흡입압력, Pi(inlet pressure) 및 압축이 끝나는 시점의 토출압력, Po (outlet pressure)와 송출이 끝나는 시점의 송출압, Pd (discharge pressure)의 크기를 Fig. 5같이 변화시킬 수 있는 방법을 검토하고 실험을 통하여 각 제어방법의 효과를 관찰하였다.

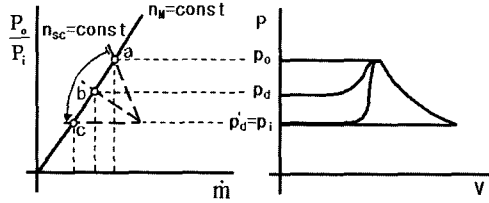
Fig. 5 (a)~(d)의 제어방법에 대한 설명은 다음과 같다.

a) 과급기 압축행정 중에 일부의 공기를 과급기의 내부에 장착된 내부 바이패스 밸브(internal bypass valve)를 통해 과급기의 흡입부로 바이패스(bypass)시켜 토출압 Po를 Po'로 낮추어 과급기의 압축일을 감소시켰다.



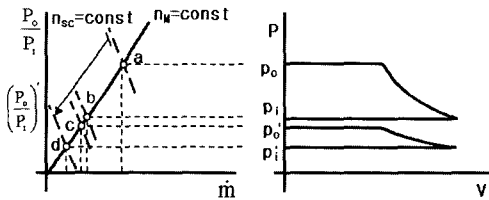
(a) IBV=Open, EBV=Close, TB=Open

b) 압축과정 완료 후, 송출 과정에서 송출 공기의 일부를 압력이 낮은 흡입부(Pi) 쪽으로 바이패스 시켜 송출압 Pd'를 흡입압 Pi와 같거나 비슷하게 만들어 송출일을 감소시켰다.



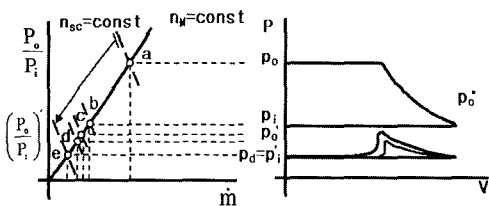
(b) IBV=Close, EBV=Open, TB=Open

c) 과급기 위치를 스톨 바디의 후단부에 장착하여 스톨 바디의 개도정도에 따라 과급기 흡입압 Pi를 낮게 함으로써 가역 단열과정의 상태방정식인 $P_o = P_i (V_i/V_o)^{\gamma}$ 에 따라 흡입압 Pi의 함수로 표시되는 토출압 Po를 낮추어 수퍼차저의 구동일을 감소시켰다.



(c) IBV=Open, EBV=Open, TB=Close

d) a) + b) + c)의 제어방법을 동시에 적용함으로써 엔진의 부분부하시 절감할 수 있는 전체 효과를 Fig. 5(d)에서 볼 수 있었다.



(d) Combination (a)+(b)+(c)

Fig. 5 Schematic investigation for part load control of screw type super-charger

2.3 스크류 과급기의 설계변경

Opcon Auto-Rotor사의 제품인 스크류 타입 과급기(OA1040)를 사용하여 2.2(a)의 제어가 가능하도록

과급기 토출단의 설계를 Fig. 6과 같이 변경하였다.

기존의 과급기에 내부 바이패스 밸브(Fig. 6(b))가 부착된 바이패스 관(bypass tube)을 설치하였으며 내부 바이패스 밸브를 열어놓으면 토출부에 낸 구멍을 통하여 압축과정의 일부 공기를 바이패스 관을 통하여 과급기의 흡입부로 되돌려 보내질 수 있다. 이로서 Fig. 5(a)에서 도식한 것처럼 부분 부하영역에서 압축일을 감소할 수 있다.

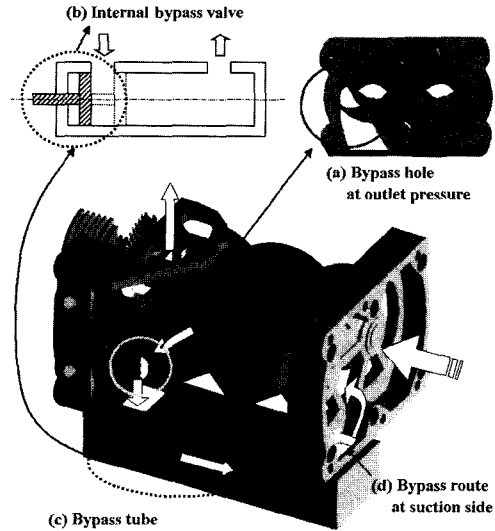


Fig. 6 Design modification and installing of internal bypass valve and bypass tube

3. 실험장치 및 방법

3.1 스크류 과급기의 제원

실험에 사용한 스크류형 과급기(OA1040)의 제원은 Table 1과 같다. Table 1에서 나타나지 않는 과급기의 구동력 특성, 발생 온도 및 제반 효율은 과급기의 구동속도와 상관관계로 Fig. 7의 특성곡선에서 얻을 수 있다.

Table 1 Specifications of super-charger OA1040

항목	제원
Rotor combination	3(male) + 6(female)
Built in press ratio	1.4
Discharging pressure	1.6 (bar)
Suction pressure	1.0 (bar)
Displacement	0.4 (Liter/Rev.)
Suction temp.	20°C

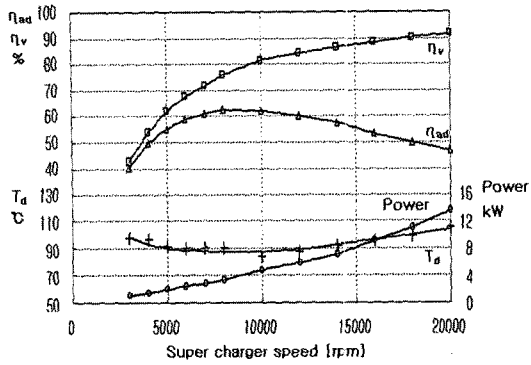


Fig. 7 Characteristic curve of screw supercharger OA1040

Table 2 Specifications of engine

항목	제원
Type	SOHC In line 4 cylinders
Bore × Stroke (mm)	75.5 × 83.5
Displacement (cc)	1495
Valves per cylinder	3
Compression ratio	7.5
Valve timing	8°BTDC/ 52°ABDC 52°BBDC/ 8°ATDC

Table 2는 실험 엔진의 제원을 나타낸 것으로 터보차저가 장착된 양산 엔진(Multi Point Injection)을 이용하였다. 실험에서는 터보차저 및 Table 1에 나타낸 제원의 스크류형 과급기를 장착하여 실험하였다.

3.2 실험장치의 구성도

Fig. 8은 엔진 실험장치의 구성도를 나타낸 것이다.

스크류식 과급기는 엔진 풀리(pulley)와 벨트(belt)로 연결되어있어 엔진 동력의 일부를 이용하여 구동하고 있다. 과급기 주위의 주요 위치에 압력 센서를 장착하였으며 엔진 운전조건에 따른 압력 값을 측정하였다. 흡입압 $P_i(P1)$ 을 변화하기 위해 흡기 스로틀 바디(inlet throttle body)와 토출압 $P_o(P4)$ 를 변화시키기 위하여 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 스크류형 과급기의 설계를 일부 변경해 내부 바이패스 밸브를 추가하였다. 실험장치의 구성도에서 P2, P3, P4는 로터(male rotor)의 압축 경로상에 설치한 압력 측정 위치이다. 즉, P2위치에서 P4위치로 이동할수록 로터의 운동 경로는 압축하는 과정을 나

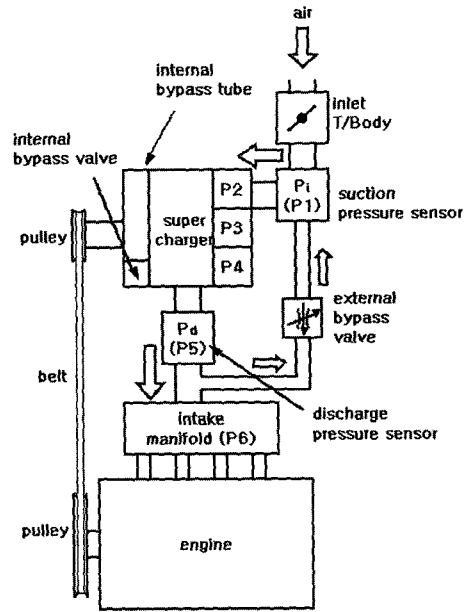


Fig. 8 Schematic diagram of test engine for part load control

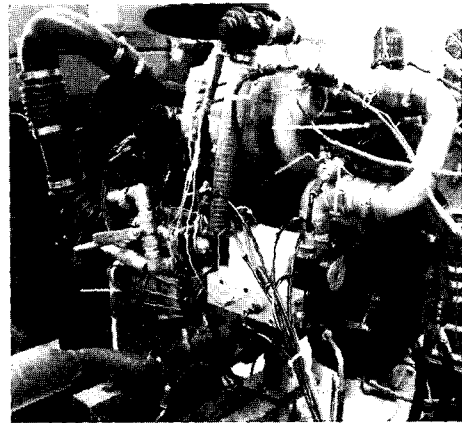


Fig. 9 Installation of super-charger on test engine (in a circle)

타낸다. 송출압, $P_d(P5)$ 을 낮추기 위한 외부 바이패스 밸브를 설치하였고 P6는 흡기 매니폴드 내의 압력을 나타낸다. Fig. 9는 실험장치에서 엔진에 장착된 과급기의 모습을 나타낸 것이다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 10은 로터 회전각에 따른 압력 변화를 나타낸 것이다. 과급기 압축 행정 중에 일부의 공기를 과급기 내부에 장착된 내부 바이패스 밸브를 통해 과

급기 흡입부로 바이패스하는 경우 ㉑와 송출 공기의 일부 또는 전부를 압력이 낮은 흡입부로 바이패스시켰을 때의 과급기 압축일의 변화 ㉒를 나타내

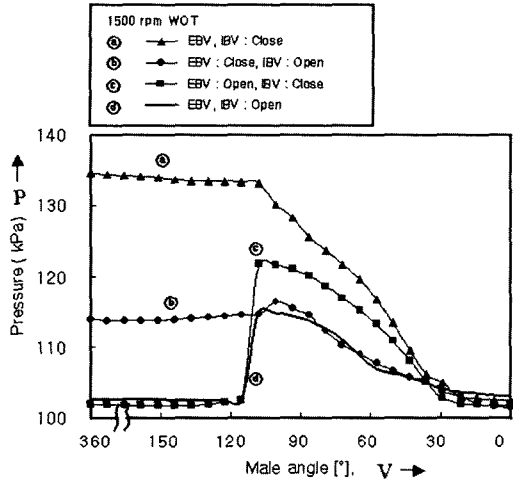


Fig. 10 Comparison of pressure variation with different control method (1500rpm, full load)

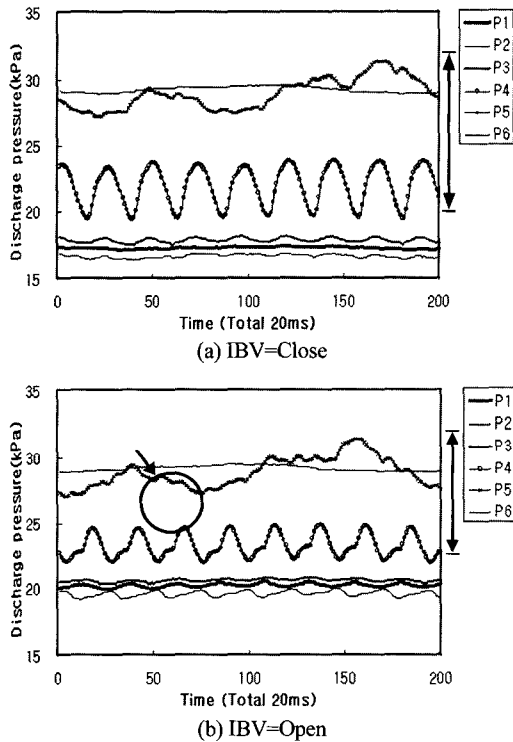


Fig. 11 Comparison of pressure variation with different control methods (1500rpm, constant throttle open fraction 18%, EBV=Close)

고 있다. 내부 바이패스 밸브와 외부 바이패스 밸브를 모두 닫은 조건인 압축일 ㉑보다 두 밸브를 모두 열어 압축된 공기의 일부를 흡입부로 공급하였을 때의 과급기 압축일 ㉒가 상대적으로 적음을 알 수 있다.

Fig. 11과 Fig. 12는 엔진 회전 속도를 1500rpm, 스로틀 밸브의 각도를 부분부하 영역인 18% 열어 놓은 상태에서 내부 바이패스 밸브와 외부 바이패스 밸브를 열거나 닫음으로서 발생하는 압력 변화를 나타낸 것이다. 압력의 측정 위치는 Fig. 8에서 나타난 P1~P6 위치이다. 과급기의 송출압 P5는 밸브의 개폐에 상관없이 시간에 따라 일정하게 거동하고 있으며 그 평균값은 흡기 매니폴드 내에서 측정된 압력인 P6의 측정값과 유사하다. 과급기 내부의 압력 측정값인 P2, P3, P4의 경우는 압축하는 과정의 진행하는 순서대로 $P2 < P3 < P4$ 의 경향을 나타내고 있다.

Fig. 11(a)는 내부 바이패스 밸브와 외부 바이패스 밸브를 모두 닫은 경우(full load)의 압력 거동특성을 나타낸 것이다. 시간에 따라 주기적으로 압력 특성이 변화하고 있음을 알 수 있다. 과급기의 흡입 압력 P2와 송출압 P5의 압력 차이를 ΔPa 로 나타내었다.

Fig. 11(b)의 경우, P4의 시간에 따른 거동 특성에서 화살표로 지시한 원호 안 형상이 Fig. 10(a)의 경우와 다르게 나타나고 있다. 내부 바이패스 밸브를 통해 압축과정에 있는 공기 일부를 흡입부로 바이패스 시킴으로서 P4의 크기가 줄어들고 동시에 과급기의 흡입 압력 P2가 상승하게 되어 $\Delta Pa > \Delta Pb$ 현상이 발생하게 되고 과급기의 압축일이 감소한다.

Fig. 12 (a)의 경우, 압축공기의 송출시 일부 공기를 외부 바이패스 밸브를 통하여 바이패스 시키면 상대적으로 ΔPa 에 비하여 ΔPc 가 크게 감소함으로 과급기의 압축일이 감소하게 된다. 이것은 외부 바이패스 밸브를 통해 압축과정에 있는 공기 일부를 흡입부로 바이패스 시켜 과급기의 흡입 압력 P2가 상대적으로 Fig. 11(b)의 경우보다 상승하게 되기 때문이다.

Fig. 12(b)는 Fig. 11(b)와 Fig. 12(a) 효과의 조합을 나타낸 것이다. Fig. 5에서 나타낸 것처럼 내부 바이패스 밸브와 외부 바이패스 밸브를 모두 열고 스로

를 밸브를 일부 제어함으로써 ΔPd 가 상대적으로 적어지고 수퍼차저에서 소요되는 압축일이 감소하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 엔진 회전 속도와 부하 조건을 변화하면서 내부 바이패스 밸브와 외부 바이패스 밸브를 연 경우와 모두 닫은 경우의 출력을 비교하여 변화되는 편차(%)를 나타낸 것이다.

편차를 나타내는 수식에서는 내부 바이패스 밸브와 외부 바이패스 밸브를 모두 닫은 경우는 각각 하첨자로 IC(Internal bypass valve Close), EC(External bypass valve Close)로 표시하였다. 반면에 두 밸브를 모두 연 경우에는 IO(Internal bypass valve Open), EO(External bypass valve Open)로 표시하였다. 수식에서 T는 토크(Torque)를 의미한다.

Fig. 13(a)에서 과급기 압축행정 중에 일부의 공기를 과급기의 내부에 장착된 내부 바이패스 밸브를 통해 과급기의 흡입부로 바이패스 시키는 것이 토출압을 낮추어 과급기의 압축일을 감소하는 효과가

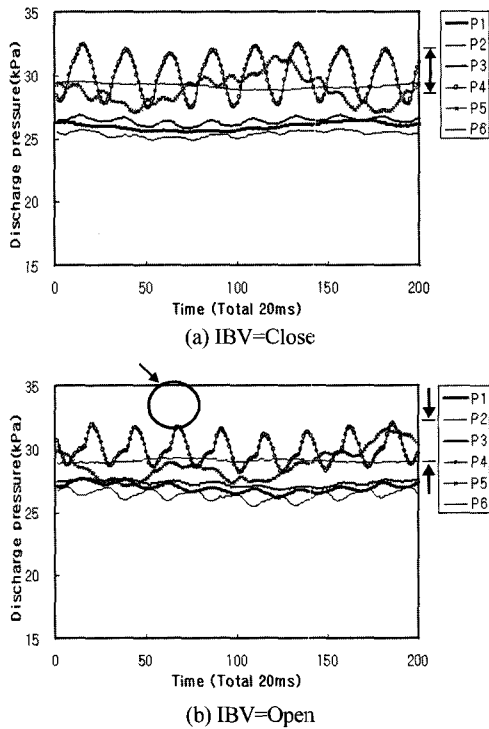


Fig. 12 Comparison of pressure variation with different control methods (1500rpm, constant throttle open fraction 18%, EBV=Open)

결국 출력 향상(7.5%)으로 나타나고 있다. 아울러, Fig. 13(b)의 경우, 압축과정이 끝난 공기를 송출할 때 송출 공기의 일부를 흡입관과 연결된 외부 바이패스 밸브를 통하여 바이패스 시켜 송출압을 줄임으로서 결국 송출일이 감소되어 부하가 낮은 영역에서는 엔진의 출력이 바이패스 밸브를 모두 닫은 경우에 비하여 약 12~13% 까지 향상되는 결과를 나타내고 있다. Fig. 13(a)와 Fig. 13(b)의 효과를 조합한 경우인 Fig. 13(c)에서는 약 15%까지 출력이 향상됨을 알 수 있다.

송출 공기의 압력이 60 kPa 이하인 부분부하 조건에서 그 효과가 크며 60 kPa 이상의 압력 조건에서

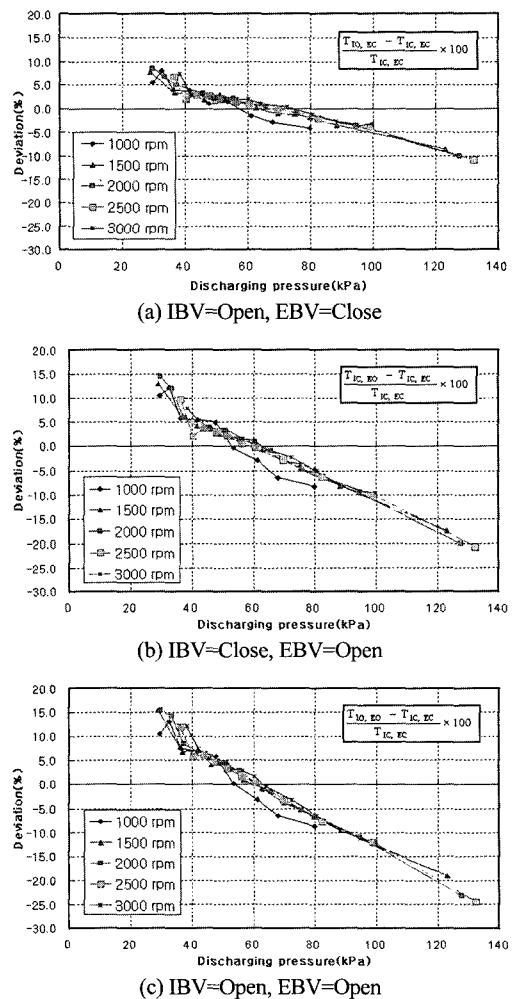
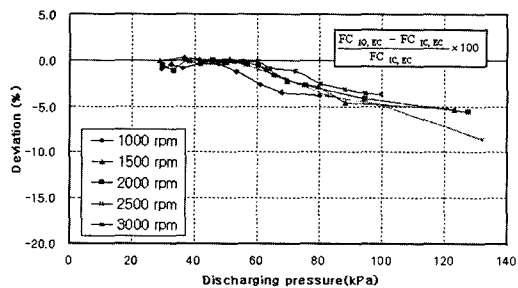


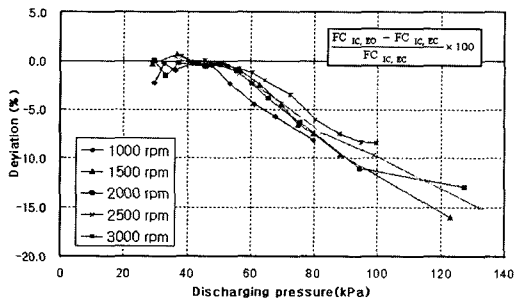
Fig. 13 Comparison of torque deviation with the different part load control concept

는 오히려 출력 저하 현상이 발생하고 있다. 이는 엔진의 중,고속 영역(송출압 60 kPa 이상)에서는 흡입 공기량의 감소에 따른 출력 저하를 의미한다. 즉, 송출압 60kPa이 부분부하 혹은 정상부하(full load) 가동조건을 결정하는 중요한 기준점으로써 활용될 수 있다.

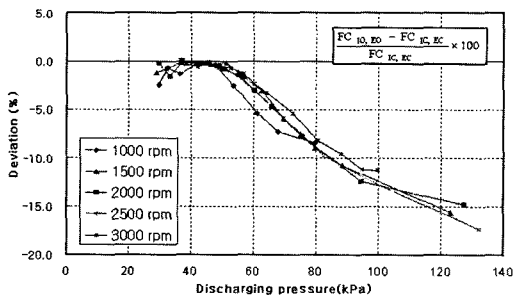
Fig. 14는 엔진 회전 속도와 부하 조건을 변화하면서 내부 바이패스 밸브와 외부 바이패스 밸브를 연 경우와 모두 닫은 경우의 연료 소모량(Fuel Consumption, FC)을 비교하여 변화되는 편차(%)를 나타낸 것이다. 송출 압력이 50~60 kPa 이하에서는 편차가 거의 없는 결과를 나타내고 있어 연료 소모의 차



(a) IBV=Open, EBV=Close



(b) IBV=Close, EBV=Open



(c) IBV=Open, EBV=Open

Fig. 14 Comparison of fuel consumption deviation with the different part load control concept

이가 거의 없는 가운데서 출력이 향상됨을 알 수 있다. 반면에 60 kPa 이상에서는 토크의 편차 경향과 같이 편차가 급격하게 증가하고 있다(Fig. 13 참조).

5. 결론

본 논문에서 과급이 필요하지 않는 엔진의 부분 부하 운전영역의 연비 개선을 위한 여러 제어방법을 실험한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 수퍼차저를 흡기 스로틀 밸브의 후단에 장착하여 흡입압 Pi와 토출압 Po를 제어함으로써 과급기의 구동력을 감소되는 것을 볼 수 있었다.
- 2) 토출압 Po를 줄이기 위해 부분부하 시에 내부 바이패스 밸브를 통해 압축공기를 흡입부로 바이패스 시켜 Po를 줄여 과급기의 압축일을 줄임으로써 구동력을 감소시키는 효과를 보였다.
- 3) 압축 후 압축공기의 송출시 일부 공기를 외부 바이패스 밸브를 통해 바이패스 시켜 흡입압과 송출압 Pd의 차이를 줄임으로써 과급기의 송출일을 줄일 수 있었다.
- 4) 1)+2)+3)의 제어방법을 모두 적용한 경우, 즉 가솔린 엔진의 경우, 연료 소모의 변화가 거의 없이 출력 향상의 목적을 충분히 달성할 수 있었다. 이는 단위 연료소모량 대비 출력 향상을 의미한다. 2)+3)의 제어방법을 흡기 스로틀 밸브가 없는 디젤 엔진에 적용한 경우에도 연비 향상의 목적을 달성할 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

이 연구는 2003학년도 단국대학교의 대학 연구비 지원으로 수행하였습니다.

References

- 1) L. H. Uthoff, J. W. Yakimow, "Supercharger versus Turbocharger in Vehicle Applications," SAE 870704, 1987.
- 2) C. Balis, P. Barthelet, C. Morreale, "Elektronisch unterstützte Turboaufladung," MTZ, 9/2002.
- 3) C. Stan, "Entwicklungs-tendenzen bei Ottomotoren," MTZ, 10/2002.

- 4) P. Walzer, K. D. Emmental, C. Klarhoefer, "Mechnische Aufladung am Beispiel des Volkswagen-G-Lader," Automobil-Industrie, 1987.
- 5) D. Huettebraeucker, C. Puchas, W. Fick, K. Joos, "The Development Concept, for Mercedes-Benz, for 4-Cylinder SI Engine with Supercharger for C-Class Cars," MTZ, 12/1995.
- 6) K. Lehmann, U. Strubbemann, U. Raese, G. Von Esebeck, "Ein Neuartiges Regelkonzept Fuer Mechanische Lader," 7. Aufladetechnische Konferenz, Dresden, 09/2000.
- 7) R. Kemmler, H. G. Lehmann, J. Schommers, "Entwicklungstendenzen Aufgeladener Ottomotoren," 7. Aufladetechnische Konferenz, 09/2000.
- 8) H. Wiedemann, H-A Kuck, "Mechanische Aufladung-Steuerung, Regelung und Applikationsbeispiele VID-IKA-LAT," 1. Achener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik Aachen, 1987.
- 9) K. Zinner, Aufladung von Verbrennungsmotoren, Springer-Verlag, 1985.
- 10) L. Rinder, Schraubenverdichter, Springer-Verlang, 1978.
- 11) D. K. Park, K. S. Lee, P. K. Oh, "Design and Performance Analysis of Screw Supercharger," Transactions of KSAE, pp.72-80, 2000.