

## 부분부하제어를 위한 스크류형 과급기 개발

배재일†, 배신철\*

### Development of a screw type super-charger for part load control

Jae-Il Bae, Sin-Chul Bae

**Key Words :** Screw type super-charger (스크류형 과급기), Inlet Throttle Body(흡기 스로틀 바디), External Bypass Throttle Body(외부 바이패스 스로틀 바디), Internal Bypass Valve(내부 바이패스 밸브)

#### Abstract

Turbo-charging or Super-charging has been used to boost engine power for Gasoline Engine and Diesel Engine came to the world at the beginning of 20<sup>th</sup> century. So far Turbo-Charger has enjoyed a high reputation in the charging filed for its technical advantages such as no demand of operation power from engine and an excellent charging effect in the event of a static operation at mid- and high engine speed. A mechanically driven Super-Charger, however, is now emerging in order to meet demands of the age of speed such as high engine power for a quick change of the driving mode - high engine torque even at low engine speed. Since Super-Charger needs driving power from engine, it cannot improve its relatively higher fuel consumption against that of Turbo-Charger. This negative point is still an obstacle to the wide use of Super-Charger. Super-Charger using Screw-type compressor which has already had a considerable base in air compressor market will fulfill this purpose of improving fuel consumption by minimizing operation power owing to no charging at idling or partially loading driving. This study aims to develop power control concept to achieve this minimization of operation power.

#### 기호 설명

- $n_M$  : 엔진 회전수
- $n_{SC}$  : 과급기 회전수
- $P_i$  : 압축 전 흡입압력
- $P_o$  : 압축 직후의 토출압력
- $P_d$  : 압축 후 송출압력
- $\eta_{ad}$  : 과급기 단열 압축 효율
- $\eta_v$  : 과급기 체적 효율

#### 1. 서론

엔진의 출력향상을 위한 수단으로 터보차저(turbo charger)에 의한 과급이 소형승용차엔진에서부터 선박용 대형엔진까지 광범위하게 적용되고

있다. 이는 외부로부터 별도의 구동력 공급 없이 중·고속 정속 주행에서 대기로 방출되는 배기가스의 에너지를 사용하여 엔진의 과급 기능을 향상시키기 때문이다. 하지만, 특히 승용차용 터보차저의 경우에는 주로 중·저속 구간인 시내주행이 대부분이며, 급가속시 발생하는 터보차저의 turbo-lag이라는 단점 때문에 가속응답시간의 지연이 발생한다. 그로 인해 최근에 와서는 Variable Geometry Turbine Type의 설계로 많은 개선이 이루어졌으나 터보차저의 구동원리에 따라 여전히 그 단점이 일부 존재할 뿐만 아니라 가격 측면에서도 불리한 점을 안고있다.<sup>(1)</sup>

중·저속구간에서 빠른 속도 응답에 대한 요구에 따라 Volkswagen은 G-Lader라고 하는 기계식 과급기를 자체 개발하였고, Daimler-Crysler는 Eaton사의 3엽식 루츠형(roots type) 슈퍼차저를 현재 2000~2300cc 엔진에 탑재하고 있다.<sup>(2,3)</sup> 또한

† 단국대학교 대학원

\* 단국대학교 기계공학과

Mazda의 Miller Cycle Engine에는 Lysholm 식의 스크류형(screw type) 슈퍼차저를 적용 중에 있는 등 많은 자동차 제조사들이 터보차저와 함께 사용하고 있다.

비록, 슈퍼차저의 장점으로 적용범위가 엔진의 과급뿐만 아니라 가솔린엔진의 Scodry Air Pump에서 차세대 기술인 연료전지(fuel cell) 자동차까지 넓어지고 있지만 슈퍼차저의 구동력이 엔진구동의 부하로 작용하여 터보차저에 비해 연비면에서 불리한 점은 여전히 개선이 요구되고 있는 실정이다.<sup>(4,6)</sup>

이러한 단점을 보완코자 본 연구에서는 풀리(pulley)를 사용하여 엔진 속도와 일정한 비율로 구동되는 기계식 과급기의 구동력을 최소화시키기 위해 과급이 필요할 때와 필요하지 않을 때를 나누어 압축과정에서 소요되는 구동력을 변화시켜 주로 시내주행에서 많이 발생하는 무부하(idling) 및 부분부하(part load)를 제어 함으로써 연비향상의 목적을 달성할 수 있다.

## 2. 부분부하제어

### 2.1 부분부하 제어의 필요성

터보차저의 경우 저속시의 낮은 과급압 때문에 가속 응답성이 떨어지는데 비하여 저속에서부터 고속에 이르기까지 과급압의 변화가 크지 않은 슈퍼차저의 가속 응답성은 뛰어나다.<sup>(2)</sup> 하지만 공회전(idling)과 감속 또는 서행과 같은 과급이 필요하지 않은 운전상태에서 슈퍼차저에 의한 높은 과급압은 가솔린 엔진의 경우 출력, 연비 및 배기가스 규제가 전자제어에 의한 완전연소영역( $\lambda=1$ )에서 운행되고 있으며 이는 엔진으로 유입되는 공기량에 비례하여 연료가 분사되기 때문에 연비가 나빠지는 원인이 되고 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로 슈퍼차저에서 송출되는 압축공기량을 줄이므로써 연료의 분사량을 줄일 수 있을 뿐 아니라, 과급기의 구동력도 줄일 수 있다.

기계식 과급기를 사용할 때 엔진의 속도에 따라 변화하는 엔진의 과급압은 Fig. 1 과 같다.<sup>(7)</sup> Fig. 1 에서 스크류식 과급기의 송출유량변화는 과급압이 증가할수록 감소한다. 이는 기계식 과급기가 가지는 공통적인 특징으로 로터(rotor)와 하우징(housing) 사이 및 압·수 회전체 사이의 틈새로 압축된 공기가 흡입구로 누설되기 때문이다. 이와 반대로 엔진의 흡입공기량은 실린더의 흡·배기 밸브가 어느 일정한 시간동안 동시에 열려 흡입공기가 배출가스와 함께 빠져나가기 때문에 과급압과

회전수( $n_M$ )가 증가할수록 더욱 많은 공기량을 필요로 한다.

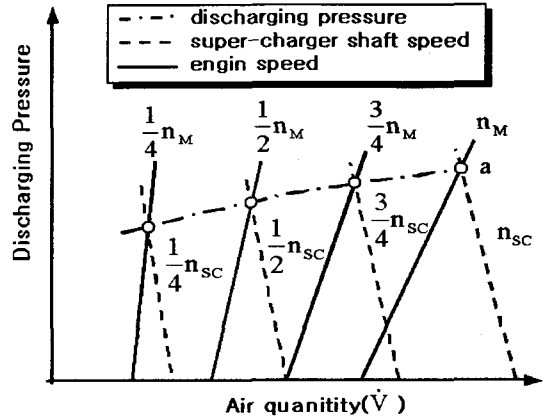


Fig. 1 Relationship of air quantity between engine and super-charger and charging pressure curve at unthrottling condition

스크류형 과급기의 구동력은 Fig. 2 과 같이 압축일(compressing work) 과 송출일(discharging work)로 이루어진다. 두가지 일의 크기를 최소화함으로써 스크류형 과급기의 구동력을 최소화시킬 수 있다.

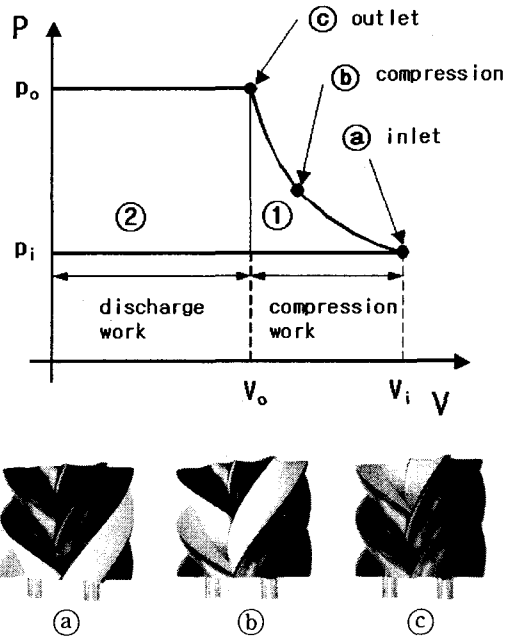


Fig. 2 Pressure and volume curve of screw type supercharger

스크류형 과급기의 구동력(adiabatic compression

work)은 다음과 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. 2의 ① 면적에 해당하고 둘째항은 송출일로 ② 면적에 해당한다. 식(1)에서 구동력은 압력( $P_i, P_o$ )와 체적( $V_i, V_o$ )의 함수로서 표시되어있지만 스크류 과급기의 설계에 따라 흡입체적( $V_i$ )과 토출체적( $V_o$ )의 크기가 결정되어 있어, 결국 압력( $P_i, P_o$ )의 변화가 구동력에 영향을 미치게 된다.

### 2.2 제어 방법

수퍼차저의 과급압을 제어하기 위해 압축이 끝나는 시점의 토출압(outlet pressure)  $P_o$ 와 송출이 끝나는 시점의 송출압(discharge pressure)  $P_d$ 의 크기를 Fig. 3과 같이 변화시킬 수 있는 방법을 논의하고 실험을 통하여 각 제어방법의 효과를 관찰 하였다.

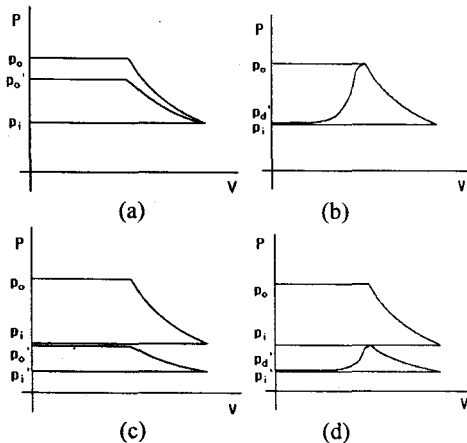


Fig. 3 Schematic investigation for part load control of screw type super-charger

Fig. 3의 제어방법에 대한 설명은 다음과 같다.

- 과급기 압축행정 중에 일부의 공기를 과급기의 내부에 장착된 내부 바이패스 밸브(internal bypass valve)를 통해 과급기의 흡입부로 바이패스(bypass)시켜 토출압  $P_o$ 를  $P_o'$ 로 낮추어 과급기의 압축일을 작게 하였다.
- 압축과정 완료 후 송출 과정에서 송출 공기의 일부를 압력이 낮은 흡입부( $P_i$ ) 쪽으로 바이패스시켜 송출압  $P_d$ 를 흡입압  $P_i$ 와 같거나 비

슷하게 만들어 송출일을 줄일 수 있게 하였다.

- 과급기 위치를 스톱틀 바디의 후단부에 장착하여 스톱틀 바디의 개도정도에 따라 과급기 흡입압  $P_i$ 을 낮게 함으로써 가역 단열과정의 상태방정식인  $P_o = P_i (V_i/V_o)^k$ 에 따라 흡입압  $P_i$ 의 함수로 표시되는 토출압  $P_o$ 를 감소시킬 수 있으므로 수퍼차저의 구동일을 줄일 수 있게 하였다.
- a) + b) + c)의 제어방법을 동시에 적용함으로써 엔진의 부분부하시 절감할 수 있는 전체 효과를 볼 수 있다.

### 2.3 스크류 과급기의 설계변경

Opcon Auto-Rotor사의 제품인 스크류 타입 과급기(OA2089)를 사용하여 2.2(a)의 제어가 가능하도록 과급기 토출단의 설계를 Fig. 4과 같이 변경하였다.

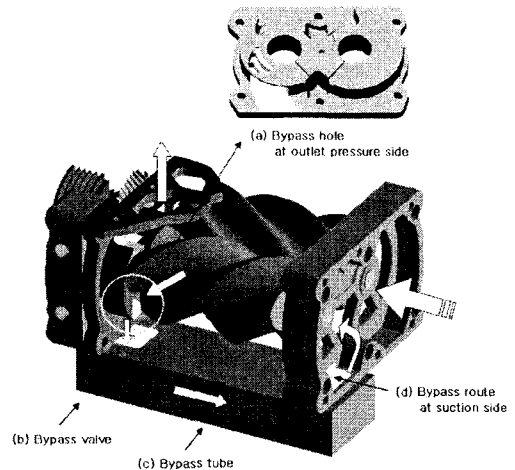


Fig. 4 Design modification and installing of bypass valve and bypass tube

Fig. 4의 (a)에서처럼 토출부에 구멍을 뚫어 과급기의 압축 행정중에 바이패스 관(bypass tube)에 부착된 바이패스 밸브를 열어 압축과정의 일부 공기를 과급기의 흡입부로 되돌려 보내고 있다.

로터의 회전각(male rotor angle)에 대한 과급기의 체적변화는 Fig. 5와 같다. 과급기 압축행정이 시작될 때의 로터 회전각을  $0^\circ$ (체적: 100%)으로 하면 압축과정은 로터 회전각  $0^\circ$ 에서 시작해서 회전각이  $110^\circ$ (체적: 76%)까지이며 이때 과급기의 압축압력은 토출압  $P_o$ 가 되고 과급공기를 엔진측으로 송출하기 시작한다.

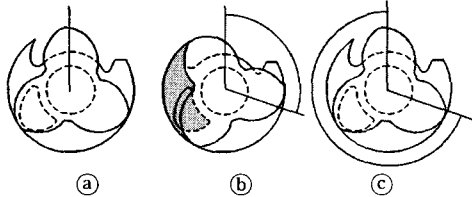
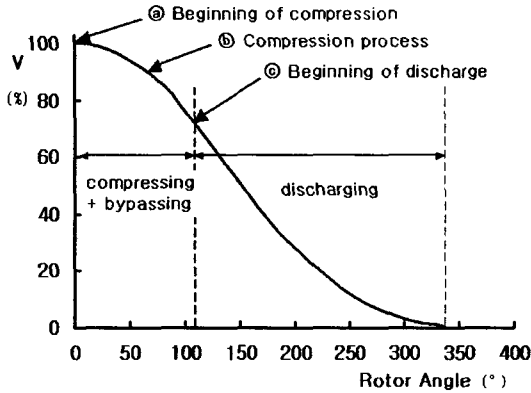


Fig. 5 Relationship between male rotor angle and volume curve in compression with bypass hole

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 스크류 과급기의 제원

실험에 사용한 스크류형 과급기(OA2089)의 제원은 다음과 같다.

Table. 1 Technical data of super-charger OA2089

항목	제원
Rotor Combination	3(male) + 6(female)
Built in Press Ratio	2.0
Discharging Pressure	2.6 (bar)
Suction Pressure	1.0 (bar)
Displacement	0.89 (Liter/Rev.)
Suction Temp.	20 °C

Table 1에서 나타나지 않는 과급기의 구동력 특성, 발생 온도 및 제반 효율은 과급기의 구동속도와 상관관계로 Fig. 6의 특성곡선에서 얻을 수 있다.

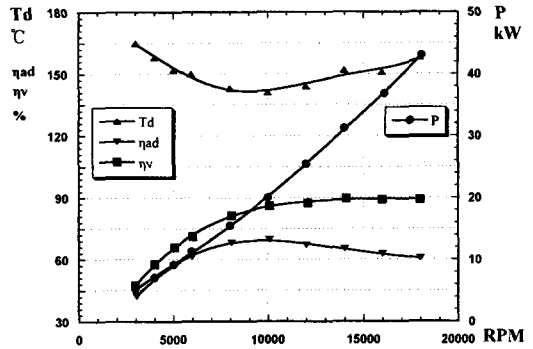


Fig. 6 Characteristic curve of screw supercharger OA2089

#### 3.2 실험장치의 구성도

본 실험 장치는 스크류식 과급기의 성능을 측정하기 위한 측정부와 여러 실험 모드를 설정하기 위한 제어부들 그리고 실험에 필요한 구동부들로 구성되어 있다.

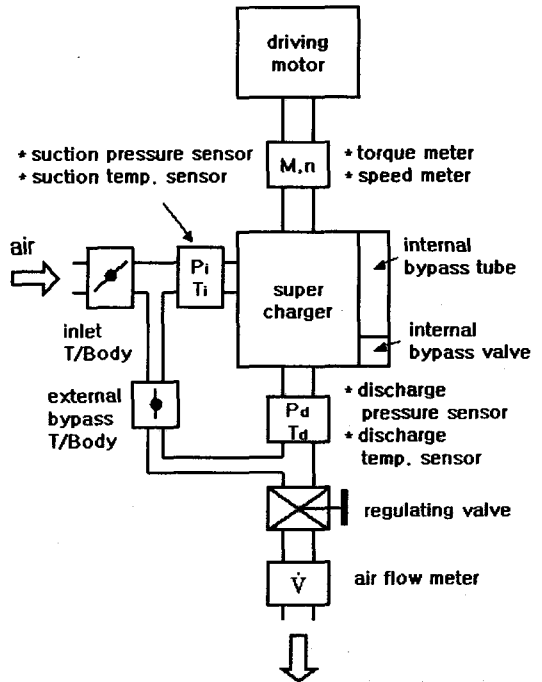


Fig. 7 Test bench for part load control of screw super-charger

측정부로 과급기에 공급되는 구동력을 계산하기 위한 구동모터의 토크(M) 및 속도(n) 측정과 과급기의 구동력을 결정짓는 열역학적 변수인 흡/토출시의 압력( $P_s, P_o$ ) 및 온도( $T_s, T_o$ )와 공기량( $\dot{V}$ )

를 측정하고 있다. 제어부로는 흡입압  $P_i$  을 변화하기 위해 흡기 스로틀 바디(Inlet Throttle Body) 와 송출압을 낮추기 위한 외부 바이패스 스로틀 바디(external bypass throttle body)를 설치하였고 토출압( $P_o$ )를 변화시키기 위하여 스크류과급기의 설계를 일부 변경해 내부 바이패스 밸브를 추가하였다. 구동부로 스크류 과급기를 구동시키는 구동모터와 송출압을 변화시킬 압력 조절 밸브(regulating valve)로 구성하였다.

### 3.3 성능실험방법

과급기의 구동력을 결정짓는 다음 4 가지의 제어방법에 따라 실험을 수행하였다.

#### 3.3.1 내부 바이패스 밸브의 개폐에 따른 변화

과급기의 압축과정 중에 일부의 공기를 과급기 내부 바이패스 밸브를 통하여 과급기 흡입부로 바이패스 시켜 토출압  $P_o$  의 크기를 낮출 수 있다. 흡기 스로틀 바디를 작동시키며, 외부 바이패스 스로틀 바디는 닫는다.

#### 3.3.2 외부 바이패스 스로틀 바디의 개폐에 따른 변화

압축과정이 끝난 공기를 송출할 때 송출공기의 일부를 흡입관과 연결된 외부 바이패스 스로틀을 통하여 바이패스 시켜 송출압 ( $P_d$ ) 를 줄여 송출일을 감소시킬 수 있다. 이 경우 흡기 스로틀 바디는 작동시키며, 과급기 내부 바이패스 밸브는 닫는다.<sup>(8)</sup>

#### 3.3.3 흡기 스로틀 바디(inlet throttle body)의 개폐에 따른 변화

흡기 스로틀 바디의 개도를 변화시키면 과급기 흡입압  $P_i$  가 결정되며 가역 단열과정으로 압축되는 토출압  $P_o$  는  $P_i$  와 비례적으로 변함에 따라 과급기의 구동력을 감소시킬 수 있다. 이때 흡기 스로틀 바디만 제어하고 외부 바이패스 스로틀 바디(external bypass throttle body) 및 과급기 내부 바이패스 밸브는 닫는다.<sup>(8)</sup>

#### 3.3.4 전 제어방법의 조합에 따른 변화

과급기 구동력의 크기를 결정할 수 있는 모든 제어요소를 함께 적용하여 총체적인 에너지의 절감효과를 측정할 수 있다. 이때 흡기 스로틀 바디 및 외부 바이패스 스로틀 바디 그리고 과급기 내부 바이패스 밸브를 모두 열어둔다.

## 4. 실험결과 및 고찰

각각의 부분 부하제어 방법에 따라 과급기의 구동력을 결정하는 토출압  $P_o$  의 크기를 변수 (0.5, 0.7, 0.85, 1.0 bar)로 하여 구동력의 변화를 관찰 하

였고 부분 부하제어를 전혀 사용하지 않은 상태의 토출압인 2.6 bar 일 경우와 비교하였다.

### 4.1 흡기 스로틀 바디의 개도 변화에 따른 영향

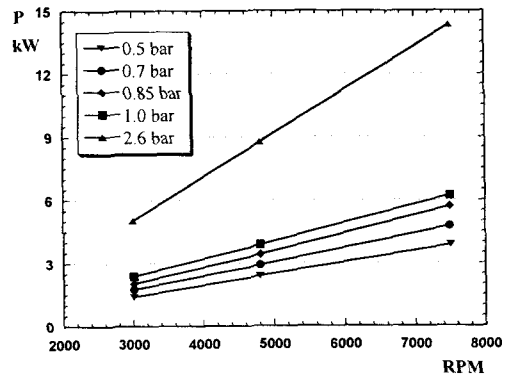


Fig. 8 Comparison of power consumption with different outlet pressure ( $P_o$ )

흡입압  $P_i$  가 변할 경우 토출압  $P_o$  는 가역단열과정으로 함께 변한다. 즉 토출압  $P_o$  가 1.0 bar 일 경우 흡입압력  $P_i$  는 0.38 bar 이며, 흡기 스로틀 바디를 모두 열어둔 상태에는 흡입압  $P_i$  가 대기압 (1bar)으로 흡입되어 토출압  $P_o$  는 2.6 bar 가 되었다. 엔진의 무부하인 공회전시 또는 저속 운행시 과급기 흡입압  $P_i$  의 범위는 약 0.2~0.5bar 사이이며 부분부하제어의 유무에 따라 구동력의 차이는 Fig. 8 에서 보듯이 현격히 나타났다. 또한 과급기 흡입압  $P_i$  의 크기에 따라 구동력이 영향을 받음을 보이고 있다.

### 4.2 외부 및 내부 바이패스량의 변화에 따른 영향 ( $P_o = 1.0$ bar 경우)

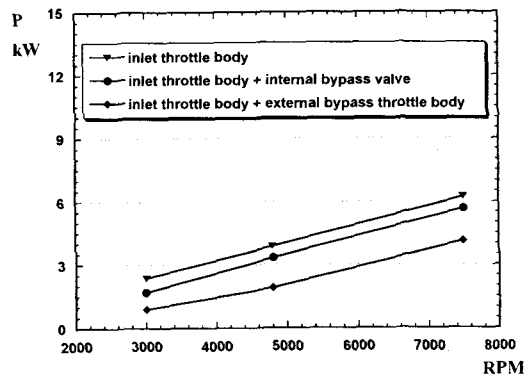


Fig. 9 Effect of part load control by reducing compression and discharging work ( $P_d = 1.0$  bar)

흡기 스로틀 바디의 개도에 의해 토출압  $P_o$  가

1.0 bar 로 고정된 상태에서 외부 바이패스 스로틀 바디의 개도를 제어하거나 내부 바이패스 밸브의 개폐를 제어하여 두가지 제어방법에 대한 구동력 감소효과를 측정하였다.

흡기 스로틀 바디를 제어하여 토출압이 1.0 bar 로 고정된 상태일 때의 과급기에 필요한 구동력보다 내부 및 외부 바이패스 량을 제어하였을 경우 추가적으로 구동력이 감소됨을 Fig. 9 에서 보여주고 있다.

### 4.3 전 제어방법의 조합에 의한 영향

앞에서 기술한 모든 부분제어방법을 흡입압의 크기에 따라 조합하였을 경우 총구동력 감소가 부분부하제어를 하지 않는 경우에 대비해 Fig. 9 에서처럼 확연히 효과가 있음을 보였다.

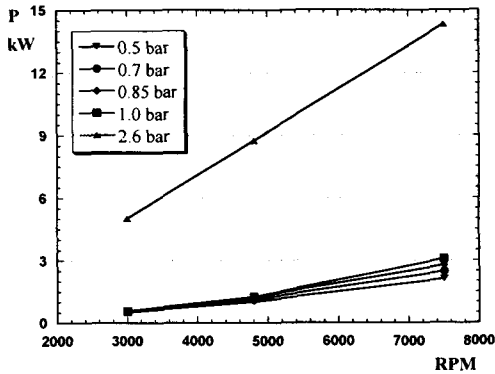


Fig. 10 Power consumption by part load control (b) and non part load control (a)

## 5. 결론

본 논문에서 과급이 필요하지 않은 엔진 운전 모드에서 연비 개선을 위한 여러 제어방법을 적용하여 실험한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 수퍼차저를 흡기 스로틀 밸브의 후단에 장착하여 흡입압  $P_i$  와 토출압  $P_o$  를 제어함으로써 과급기의 구동력을 감소되는 것을 볼 수 있었다.
- 2) 토출압  $P_o$  를 줄이기 위해 부분부하 시에 내부 바이패스 밸브를 통해 압축공기를 흡입부 바이패스 시켜  $P_o$  을 줄여 과급기의 압축일을 줄임으로써 구동력을 감소시키는 효과를 보았다.
- 3) 압축 후 압축공기의 송출시 일부 공기를 외부 바이패스 스로틀을 통해 바이패스 시켜 송출

압  $P_d$  를 줄임으로써 과급기의 송출일을 줄일 수 있었다.

- 4) 1)+2)+3)의 제어방법을 모두 적용한 경우, 즉 가솔린 엔진의 적용시 연비 향상의 목적을 충분히 달성할 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) Loren H. Uthoff, John W. Yakimow, "Supercharger versus Turbocharger in Vehicle Applications", SAE, 870704, 1987
- (2) P. Walzer, K.D. Emmetal, C. Klarhoefer, "Mechnische Aufladung am Beispiel des Volkswagen-G-Lader", Automobil-Industrie, 1987
- (3) 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
- (4) K. Lehmann, U. Strubbemann, U. Raese, G. Von Esebeck, "Ein neuartiges Regelkonzept fuer mechanische Lader", 7. Aufladetechnische Konferenz, 09/2000, Dresden
- (5) R. Kemmler, H.G. Lehmann, J. Schommers, "Entwicklungstermdenzen Aufgeladener Ottomotoren", 7. Aufladetechnische Konferenz, 09/2000
- (6) H. Wiedemann, H-A Kuck, "Mechanische Aufladung-Steuerung, Regelung und Applikationsbeispiele VID-IKA-LAT", 1. Achener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik Aachen, 1987
- (7) K. Zinner, "Aufladung von Verbrennungsmotoren", Springer-Verlag, 1985
- (8) L. Rinder, "Schraubenverdichter", Springer-Verlang, 1978