

# COMPREX 압력과 과급기의 作動 및 應用

(Working principles & Application of Comprex Pressure Wave Super Charger)

\* 본 자료는 SAE 830234 및 1983 일본 내연기관지에서 발췌 번역하였음.

저 자 : George Gyarmathy

譯 者 : 채 재 우\*  
Jae- ou Chae

## 要 約 文

본 論文은 Comprex 압력과 과급기(Pressure-wave Supercharger; 이하 PWS)의 공기 역학적인 원리에 대해 기술하였으며, 또 기체 동역학적인 현상들이 별도의 제어장치없이도 우수한 운전성과 낮은 연료소모율, 적은 배기 배출물을 형성하는 차량들에 對해 기계적으로는 간단하면서도 완벽한 boosting 장치를 만들어 내는데 어떻게 사용될 수 있는지를 설명하였다.

근본적인 目的은 종래의 turbo charger 와 동일하지만 Comprex PWS는 현재 응용되고 있는 승용차가 요구하는 여러가지면, 즉

- 1) 부하변동에 대한 충전공기압의 빠른 응답성
- 2) 엔진속도全域旅游에 걸친 높은 boost 효과
- 3) 배기배출물특성을 좋게할 수 있는 배기 가스 재순환(EGR)효과

등에서 종래의 것과 구별된다.

따라서 PWS의 중요한 특징들을 기술하였으며 마지막으로 최근 자동차용 Diesel Engine에의 몇가지 예를 보였다.

## 1. 作動原理

PWS는 만일 각각 다른압력을 가진 2가지 流體가 직접접촉을 하게되도록 유도된다면 압력이 동일하게 되는 시간은 혼합되는 시간보다 빠르다는 물리적사실을 이용한다. 이는 특히 유체가 좁고 가느다란 流路(이하 Channel 또는 Cell)로 유도된다면 더욱 그렇다. 그림 1은 Comprex PWS의 개략도이다. Channel

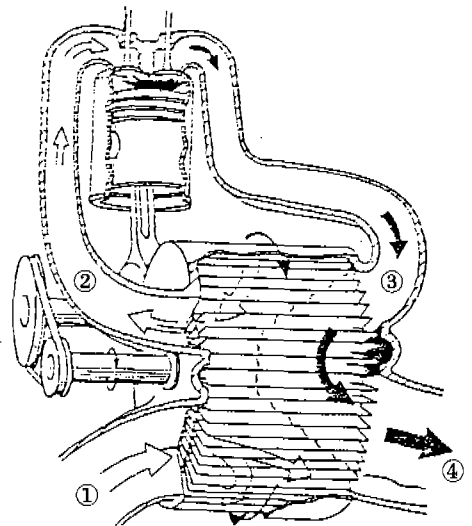


그림 1. Comprex 과급기의 개략도

은 끝이 열려져 있으며 크랭크축으로부터 벨트로 구동되며 2개의 casing 사이에서 일정한 속도로 회전되는 회전체(rotor) 주위에 배열되어 있다.

Casing과 rotor 면사이의 접촉은 없으며 누설을 최소화하기 위해 그 틈새는 매우 작게 유지되어 있다. 한쪽 Casing은 공기청정기와 연결되어 있는 流路①과 엔진 흡기다기관과 연결되어 있는 流路②를 포함하고 있으며 이를 "공기 Casing"이라 한다. 또 다른쪽은 "가스 Casing"이라 하며 배기다기관과 연결된 가스 흡입로③과 tailpipe로 빠져나가는 가스배기로④로 구성되어 있다. Casing 내면에는 각流路和 연결된 구멍(Port)이 있다. 이들 구멍을 통하여 유체는 rotor channel로부터 나가거나 들어올 수 있다.

가스유입구멍은 다기관內에서 충분한 압력 상승을 얻기에 충분하도록 작게 만든다. 따라서 이러한 流路들에 대한 적당한 배치와 구멍(port)의 위치 및 폭의 세심한 선택에 의해 효율적인 에너지 전달과정이 실현될 수 있다. 좀더 상세한 설명을 위해서 rotor의 원주운동을 직선형운동으로 바꾸어 표현한 것을 살펴보면서 완전히 1회전하는동안 Channel內에서 일어나는 결과에 대해서 알아보자.

그림 2에서 보는 것처럼 맨윗쪽에서 출발하며 양쪽끝이 막혀 거의 대기압의 新氣를 포함한 Channel은 먼저 가스흡입구③에 노출된다. 바로 뒤이어서 그 반대편쪽이 충전공기배출구②와 연결된다.

그다음 양쪽끝은 다시 닫히게 된다. 다시 가스배출구④에 도달하고나면 반대편쪽은 新氣흡입구①과 만나게 된다. ④구멍은 ①구멍보다 Channel內의 掃氣作用을 돕기위해 크게 만든다. 다시 Channel이 닫히게 될때 다음 싸이클을 위해 Channel內에는 新氣가 채워져 있게 된다. 압력과의 운동을 보여주고 있는 대각선들은 다음에 좀더 상세히 설명할 것이다. 또 가는 점선은 流體사이의 경계를 표시한다. 정격 엔진출력에서 ②와 ③에서의 압력은 2 bar 정도이며 ①과 ④에서는 거의 대기압(약 1 bar)에 접근한다.

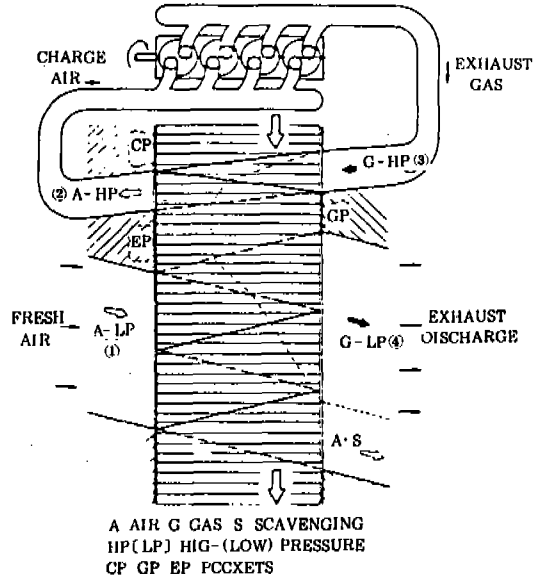


그림 2. PWS의 1 싸이클

## 2. THE PRESSURE-WAVE CYCLE

이번에는 Channel 또는 Cell 内部에서의 결과에 對해 좀더 세밀히 검토해 보자. 먼저 Cell內의 流動은 마찰이 없으며 단열적이고 1차원적이라고 가정하자. 그림 3a와 그림 3b는 임의로 선택된 14개의 Channel을 보여준다. 과정은 먼저 Cell이 엔진에서부터 도달된 배기가스를 만나기 시작하는 위치 즉 그림 3.a의 맨 윗부분에서부터 시작된다.

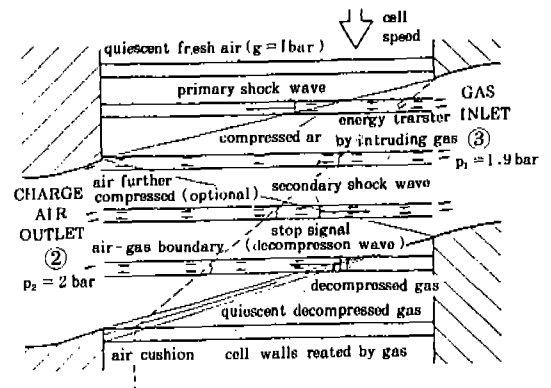


그림 3. a. PW싸이클에 있어서 고압부에서의 거동

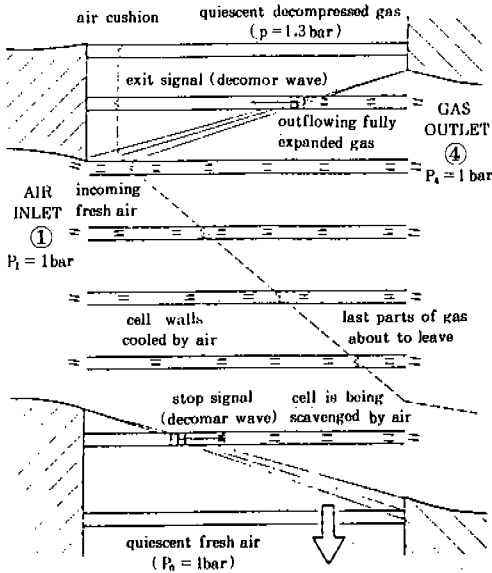


그림 3. b. PW 사이클에 있어서 저압부에서의 거동

그점에서 Cell 內에 이미 포함된 공기는 왼쪽으로 밀리게 된다. 압력상승은 극히 짧은 시간內에 이루어지므로 Channel 內체적에는 영향을 미치지 않는다. 주입된 배기가스는 충격파(Shock wave)의 원인이 된다. 즉, 압력파의 속도가 음속보다 커지게 되며 압력의 급상승을 초래한다. 압축과정은 충격파(1차 충격파)가 Channel의 왼쪽끝까지 도달했을 때 끝나게 된다. 맨위에서 3번째 위치를 보라. 압축된 공기의 流動을 유지하기 위해서 Cell의 왼쪽 끝단은 충격파가 거기 도달했을 때 열려 있어야만 한다. 따라서 압축된 공기는 엔진으로 연결되는 공기배출구 ②쪽으로 밀릴 것이다. 보통 ②에서의 압력이 ③에서보다 높게되며 각 구멍(port)은 설계되고 있다. 이러한 경우 이 높은 압력은 또다른 압력파의 형태로써 Cell 內로 전파된다. 이를 2차 충격파(Secondary Shock Wave)라고 한다.

가스주입구를 단음으로 해서 흡입流動은 끝나게 된다. 流體의 관성은 流動을 유지시키려 하고 가스 Casing 벽근처의 유체입자들은 팽창되어 자체 압력을 떨어뜨린다. 이러한 교란을 감압파(Decompression wave)라 부르며 음

속으로 공기측을 향해 전파된다. 이 감압파는 공기가 Cell의 공기측에 도달하기도 전에 공기-가스경계층을 앞지를 수도 있기때문에 중요하다. 그순간 모든 流動은 정지되며 공기측은 닫혀지게 된다. 지금 Cell 內에 잡혀있는 流體는 약 1.3bar 까지 감압된다.

따라서 공기측에는 1.3 bar의 공기층이 형성된다. 위의 결과는 Cycle의 고압부(High Pressure Part)라고 불리워진다. 고압부의 目的은 공기를 압축하며 그 압축된 공기를 엔진에 보내주는 것이다. 또 저압부(Low pressure Part)는 가스를 배출시키고 공기流動으로 Cell 벽을 냉각시키며 냉각된 Cell 內에 新氣를 다시 채우기 위해 고안되었다. 그림 3.b에서 맨위의 위치는 고압부의 끝순서에 해당한다.

다음에 Cell은 압력이 거의 1bar인 가스배출구④를 만나게 된다. 아직까지 1.3 bar인 Cell 內의 유체는 배출구쪽으로 팽창하게 된다. 이것은 또 감압파가 된다. 이것이 Cell의 반대쪽에 도달함에 따라 전체 Channel 內의 流速은 균일하게 된다. 이 순간에 공기흡입로는 Cell에 연결된다. 유체의 관성에 의해 新氣는 流路로부터 Cell로 들어오게 되며 따라서 공기-가스 경계층은 가스배출구쪽으로 이동하게 된다. 만일 ①과 ④에서의 압력이 정확히 같고 또 ④에서 운동에너지의 손실이 없다면 배출유동은 무한히 계속될 것이다. 실제로 공기청정기와 tailpipe 및 머플러에서의 유동저항이 ①에서의 압력을 대기압보다 낮게, ④에서의 압력을 대기압보다 높게 유지시킨다. 따라서 Cell 끝에서의 압력은 공기흡입구가 열릴 때 점차 감소할 것이며 감압파는 가스쪽으로 가면서 약해질 것이다. 하지만 ④에서의 높은 압력은 재조정을 일으켜 감압파는 다시 공기측으로 이동하게 될 것이다. 경사선은 압력파의 전파선을 나타낸다. 즉 실선은 충격파를 점선은 감압파를 나타낸다.

위에서 언급한 과정의 정성적인 기술은 Comprex PWS에 대해 다음의 몇몇 특징을 보여준다.

- 1) gas 흡입유동의 변화(엔진부하변동)는 수밀리초안에 공기측으로 전파된다. 이것이 PWS의 순간 boost 응답성을 설명해 주는것이며 그결과 우수한 운전성과 낮은 매연배출률의 실현이 가능하다.
- 2) 정격 운전상태에서 가스배출유동은 掃氣作用을 위해 사용되는 찬공기에 의해 희석되어 talpipe 및 머플러의 수명을 길게할 것이다.
- 3) 저부하상태에서는 Cell 內로 가스의 재추입때문에 EGR 이 형성될 것이다.
- 4) 저압부 배관측은 낮은 유동저항을 주도록 설계되어야 한다.

### 3. Boost 對 엔진속도

정격속도  $n_R$  이 정해지면 Boost 압력이 어떤값  $P_{2,R}$  로 정해지고 다른 속도에서 얻을 수 있는 최대 Boost는 과급기의 종류에 따라 정해질 것이다. 그림 4는 PWS와 Waste-gate (WG)를 사용한 종래의 과급기사이의 비교를 보여준다. Turbo charger (TC)는 저속에서 Boost 능력이 떨어지며 이는 크기가 작은 터어빈을 설치함으로써 향상(TC1 대신 TC2)시킬 수 있다. Comprex PWS (CX1)은 엔진속도 전반에 걸쳐 높은 Boost 효과를 보이고 있다.

가장 현저한 차이는 저속영역에서이며 PWS에서도 WG를 설치할 수 있는데 저속에서 효과가 있음을 알 수 있다(CX1 대신에 CX2 + WG)

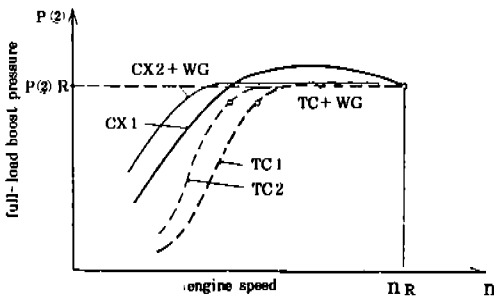


그림 4. 과급기의 Boost 압력특성

### 4. POCKET의 역할

Comprex PWS에서는 Cell 內에 여러가지作用을 도울 목적으로 그림 2에서 점선으로 표시한 것처럼 3개의 Pocket이 있다. 즉 Compression Pocket (CP)는 특히 저속상태에서 1차 충격과를 완화시키며 충전공기의 예압축을 유발시킨다. Gas Pocket (GP)와 Expansion Pocket (EP)는 모든 조절상태가 불량한 상태에서 掃氣作用을 돕는다. 모든 Pocket을 포함한 유동과정은 오히려 복잡하며 광범위한 Computer Program을 사용하여야만 분석이 가능하다.<sup>(3,4)</sup> Pocket이 작동하는 방법은 다음의 대략적인 현상설명으로부터 알 수 있다. 그림 5는 승용차용 Diesel Engine의 극단적인 3가지 운전상태를 표시한다.

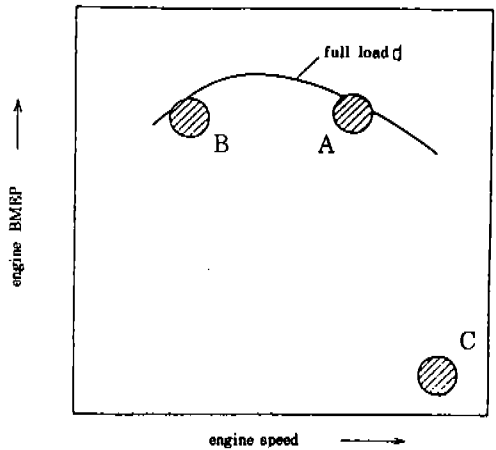


그림 5, 그림 6, 7, 8에서 고려하고 있는 운전상태

- Case A : 중속, 전부하
- Case B : 저속, 전부하
- Case C : 고속, 저부하

Pocket이 설치된 PWS 內에 위의 운전조건에 대한 유동장이 그림 6, 7, 8에 나타나 있다. 검정 및 흰 화살표는 각각 가스와 공기의 속도 및 방향을 표시한다. 점선은 가스와 공기의 경계층을 표시한다.

Case A : A의 경우는 PWS의 공칭운전상

태에 해당한다. 여기서 전과정은 이상적으로 동작하며 Pocket은 작동치 않는다. (이말은 Pocket을 거치는 동안 Cell內 압력의 불변에 의해 Pocket에 포함된 유체는 거의 정지상태에 있다는 것을 의미한다.)

流路①②③, 그리고 ④에서 거의 균일한 流動을 얻을 수 있도록 조정하면 ③으로부터의 배기가스는 Cell의 중간정도까지 흘러 들어

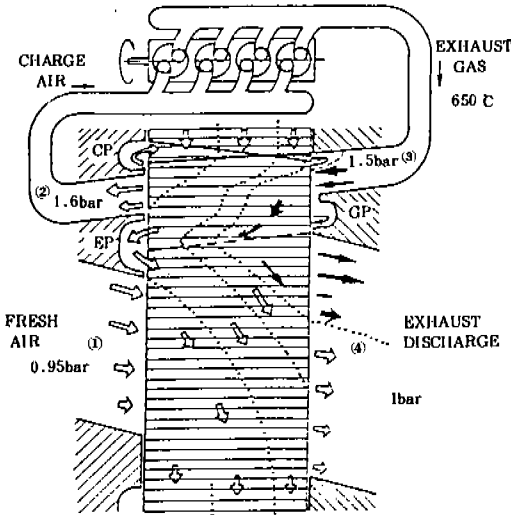


그림 6. Case A의 유동상태

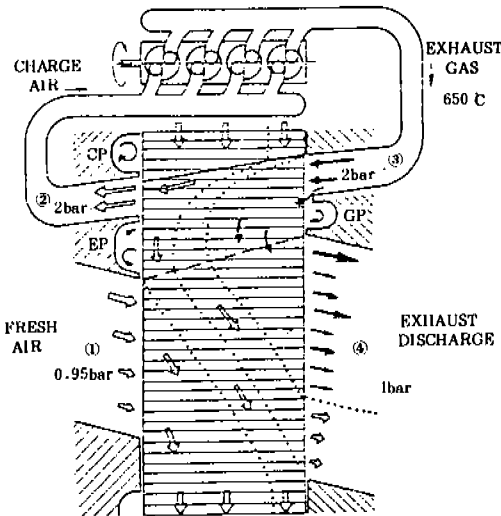


그림 7. Case B의 유동상태

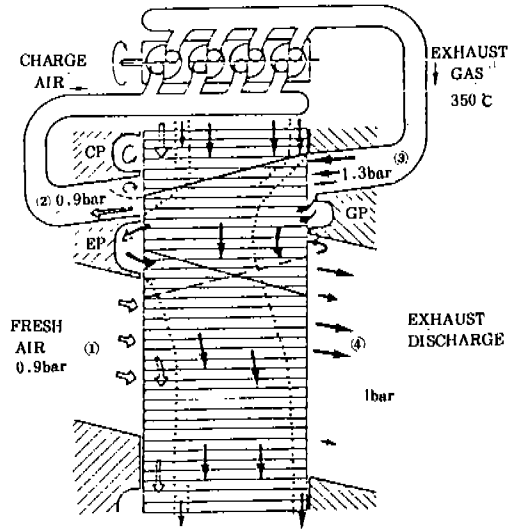


그림 8. Case C의 유동상태

갔다 ④로 나오게 된다. 고압부로부터 이동하여온 공기중의 일부도 ④로 흘러 나간다. 이 掃氣作用은 PWS의 만족한 구동을 위해서는 매우 중요하다. 품위가 낮아진 공기는 다음 사이클로 유입되지 않도록 해야 한다. 여기서 품위가 낮아진 공기란 가스에 의해 오염되고 또 가스층과 오랜시간 접촉에 의해 과열된 공기를 말한다.

Case B: B가 A의 경우와는 엔진속도를 낮춘 것이 다르다. 따라서 이말은 늦은 rotor의 운동과 낮은 체적유량을 의미한다. 1차 충격파는 rotor의 늦은 운동속도때문에 ②가 열리기도 전에 공기층에 도달한다. Compression Pocket (CP)때문에 충격파의 심한 반사현상은 발생하지 않으며 압축된 공기는 CP를 향해 들어간다. 이 격렬한 공기의 내부유동은 CP내부에서 압력을 유발(약1.3bar)하며 공기를 강제적으로 대기압상태로 채워져 있는 Cell로 밀어낸다. 예압축파(Precompression wave)는 Cell의 중간지점 정도에서 1차 충격파와 만나게 된다. Cell의 공기는 gas층끝에서 처음으로 고압의 가스에 노출된다. 곧이어 압력의 상승과 정체, 심지어는 역류(③영역에서 재순환이 생기는 것을 보라)를 동반하는 예압축파가 도달한다. 공기배출구 ②에

서의 속도장이 아주 균일하지는 않다. B의 경우 두번째 재미있는 특성은 싸이클의 저압부에서 나타난다. ④가 열림으로 해서 발생하는 감압과는 Expansion Pocket (EP)의 중간지점에서 만나게 된다. 거기에서 격렬한 통과유동을 만든다. 따라서 EP는 팽창에 의해 만들어진 가스배출유동이 1차 충격파의 강한 반사현상에 의해 방해받는 것을 막는다. 지금 新氣는 ①로부터 흡입된다. 그림에서 보는 바와 같이 掃氣作用은 충분하다. 따라서 Cell 벽은 냉각이 잘 되며 엔진은 깨끗한 충전공기를 받게 된다.

Case C : C의 경우는 고속 공회전이며 rotor는 빠르게 움직인다. ②에서 공기의 체적유량은 높다. 흡입가스의 낮은 온도때문에 가스의 체적유량은 너무 낮아 ③에서 고압부를 형성하지 못한다. 1차 충격파는 약하다. 매우 빠른 rotor의 속도때문에 1차 충격파는 공기배출구 ②의 중간쯤에 도달하고 따라서 짧은 구역동안만 압축이 되는 실정이다. 다량의 배기체적유량은 높은 배기속도를 유발하며 ②에서는 낮은 압력을 초래한다. 1차 충격파에 의해 압축된 유체의 일부는 EP로 보내어지게 되고 EP空洞의 아랫부분으로부터 다시 rotor로 보내어지게 된다. 掃氣作用은 ④를 열어 줌으로써 이루어지게 된다. 일반적으로 낮은 가스압력은 충분한 배출유동을 줄만큼 Energy를 가지지 못한다. 하지만 가스배출유동의 속도가 감소하기 시작하면 EP에 의해 생긴 추력(Thrust)은 가스축으로 전해지며 잠시동안 배출유동은 다시 생기를 되찾게 된다. EP의 도움에도 불구하고 모든 배기가스를 배기구로 유도하기에는 불충분하며 따라서 얼마정도의 가스는 다음 싸이클로 보내어지게 된다. 이결과 대부분의 rotor속에는 배기가스가 섞이게 된다. 충전공기는 가스로 오염(②부분에서 사선으로 표시) 즉 EGR이 일어난다. EGR 현상은 저부하시 Comprex PWS에서 일반적인 특성이라는 것을 알 수 있다. 또 PWS에서 자연적 혹은 인위적인 EGR특성은 연소과정중 질소산화물, NOx의 생

성을 감소시키는 데에도 유용하다. 모든 부하와 속도에 대해서 적절한 운전상태를 주기 위해서 Comprex PWS의 Pocket 들은 최적상태를 주도도록 설계되어야 한다.

### 5. 應 用 例

그림 9는 여러가지 다른 크기의 엔진에 대한 전부하시 BMEP곡선을 보여주고 있다.

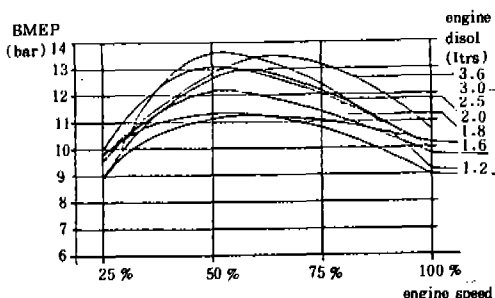


그림 9. Comprex PWS이 의해 얻은 전부하시의 BMEP곡선

거의 모든 엔진이 상당히 높은 Torque를 보이고 있다.

Mayer와 Schrut의 주장에 의하면 이 특징은 극히 우수한 도시평균 연료경제성을 주는 자동차의 설계에 어떤 방향성을 준다고 한다. (8,9) 우수한 저속 Boost 효과는 그림에서 보는 것처럼 정격속도의 25%에서의 BMEP가 정격속도의 BMEP와 거의 같다는 사실에 의해 명백해진다. 그림 10과 11은 BMEP와 속도의 관계도로서 Comprex PWS형 4기통 IDI 엔진의 성능을 설명한다.

그림 10은 Boost 압력비  $P_2/P_1$ 의 등압선과 단열 Boost 효율,

$$\eta_{is} (\eta_{is} = \frac{\text{단열 압축과정에서의 공기온도의 상승}}{\text{실제의 경우 공기온도의 상승}}),$$

또 엔진의 평균 압력차이를 특정지워주는  $(P_3 - P_2)/P_1$ 의 비를 나타내고 있다.

자동차 엔진의 경우에서 볼 때 가장 좋은 효율은 선도의 중앙부근에서 찾아볼 수 있다. 그림 11은 필연적으로 발생하는 EGR 체적율

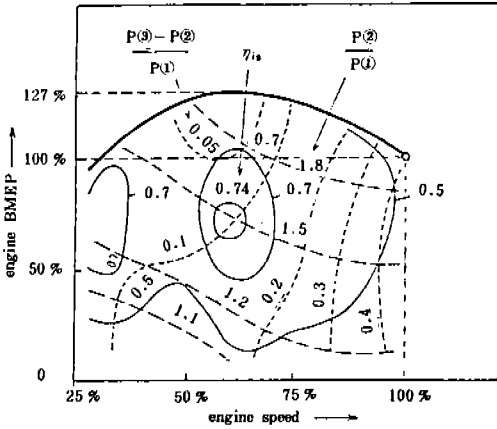


그림 10. Complex PWS형 4 실린더 IDI 엔진의 특성곡선

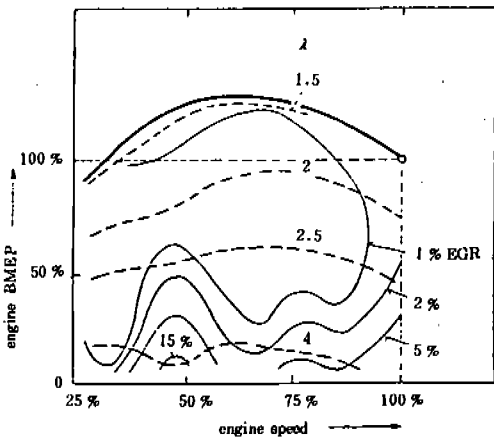


그림 11. Complex형 4 실린더 IDI엔진의 EGR 특성 및 공기과잉율

과 공기과잉비  $\lambda$ 를 표시한다.

$$EGR = \frac{\dot{m}_2 \text{ gas } M_3}{\dot{m}_2 M_2}$$

$$\lambda = \frac{(1 - EGR \cdot M_2 / M_3) \dot{m}_2}{\dot{m}_2 \text{ stoich}}$$

여기에서  $\dot{m}_2$ 는 엔진으로 공급되는 쏠실제 유량을 표시하며  $\dot{m}_2 \text{ gas}$ 는  $\dot{m}_2$ 에 포함된 배기가스량을,  $\dot{m}_2 \text{ stoich}$ 는 이론연소에 필요한 순수 공기 유량을 표시한다.  $M_3$ 와  $M_2$ 는 각각 배기가스와 공기의 분자량이다. 저부하에서는

EGR이 심각한 반면 그림 11은 고부하에서는 깨끗한 공기가 엔진에 공급된다는 것을 보여준다.

### 6. 結 論

Comprex 압력과 과급기(Pressure - Wave - Supercharger)에서 불균일한 gas 운동에 의한 에너지 전달과정에서의 독특한 장점이 디젤 엔진의 과급기에 유용하게 적용되었다. Port와 Pocket을 포함하여 최적 설계화된 내부형상물의 이용에 의하여 자동차나 그밖의 운송수단에서 발생하는 엔진속도 부하등의 전반에 걸쳐 어떤 적당한 성능을 보장할 수 있다. 이 과급기의 중요한 장점은 첫째, 고속·저속에서의 높은 Boost 효과, 둘째 부하변동에 대한 충전 공기압의 빠른 응답성, 셋째 작동중 필연적으로 발생하는 EGR 특성이다. 따라서 Comprex PWS는 높은 출력/무게(Power / Weight)비, 낮은 연료소비율, 또 적은 smoke 양 및 NOx 배출이 요구되는 승용차용 디젤 엔진에는 필수적이라 할 수 있다.

앞에서도 설명했던 바와같이 알맞는 설계는 rotor의 벨트구동 장치와 소음을 줄일 수 있도록 적은 공기 역학적인 저항을 줄수 있는 tailpipe 계통의 설치일 것이다.

Comprex PWS는 승용차나 그밖의 다른 상업용 운송수단에서 사용하는 디젤 엔진 전반에 걸쳐 유용하다.

### REFERENCES

- 1) De Haller, P.: "The Application of a Graphic Method to Some Dynamic Problems in Gases". Sulzer Technical Review, 1945, No. 1 pp. 6-24.
- 2) Jenny, E.: "Berechnungen und Modellversuche Ueber Druckwellen Grosser Amplitude in Auspuffleitungen". Doc-

- toral Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland, 1949. AMEBA — Druck, Basel, Switzerland.
- 3) Berchtold, M.: “Druckwellenaufladung für kleine Fahrzeug-Dieselmotoren” Schweiz. Bauzeitung 79 (1961), No. 46, pp. 801-808.
  - 4) Croes, N.: “The Principle of the Pressure-Wave Machine As Used for Charging Diesel Engines”. Proceedings of the 11th International Symposium on Shock Tubes and Waves, Seattle, Washington, USA, July 1977. University of Washington Press, 1978.
  - 5) Croes, N.: “Die Wirkungsweise der Taschen des Druckwellenladers Comprex”. MTZ Motortechnische Zeitschrift, Vol. 40, No. 2, 1979, pp. 91-97.
  - 6) Hörler, H.U.: “Abschätzung der Verluste in Instationär-Gasdynamischen Kanaltrommel-Drucktauschern”. Doctoral Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland, No. 4402. Juris Druck und Verlag, Zurich, Switzerland, 1969.
  - 7) Walzer, P. and Rottenkolber, P.: “Supercharging of Passenger Car Diesel Engines”. The Institution of Mechanical Engineers, London, England, October 1982. I Mech E. Conference Publications 1982-9.
  - 8) Mayer, A., Schruf, G.: “Practical Experience With Pressure-Wave Supercharger Complex on Passenger Cars.” The Institution of Mechanical Engineers, London, England, October 1982. I Mech E Conference Publications 1982-9.
  - 9) Mayer, A., Schruf, G.M. and Kirchofer, H.: “Downsizing and Downspeeding of Automotive Diesel Engines — Theory and Practice”. Society of Automotive Engineers, Detroit, Mich., USA, 1982. SAE Technical Paper No. 820443.
  - 10) Jenny, E. and Zumstein, B.: “Pressure-Wave Supercharging of Passenger Car Diesel Engines”. The Institution of Mechanical Engineers, London, England, April 1982. I Mech E Conference Publications 1982-3.