

Otto 엔진의 연소실 Layout *

(Combustion Chamber Layout for Modern Otto - Engine)

D. Gruden 저
 편 집 실 역

1. 개 요

지난 십년간 내연기관에 대한 연구와 개발은 연료경제성의 향상과 유해배출물의 감소에 집중되어 왔다. 이러한 목표는 비록 엔진의 소음감소 등의 새로운 요구조건에 따라 다소 변화가 있겠지만, 가까운 장래에 있어서도 엔진개발의 중요변수로 작용할 것이다. 그리고 종래와 마찬가지로 엔진개발에 대한 성패여부는 전통적인 요구조건, 즉

- 높은 운전 신뢰성
- 낮은 생산단가
- 높은 비출력

에 의하여 판단될 것이다.

연료소비율과 유해배출물에 대한 지금까지의 감소효과는 운전변수(operational parameter), 즉

- 공연비
- 점화시기
- 배출가스의 온도

등을, 변화하는 운전조건에 따라 보다 효과적으로 적응하게 할 수 있도록, 혼합기의 제어와 점화 그리고 배출물의 후처리 등의 분야에 적절한 조치를 취한 데 기인한 바 크다. 그러나, 혼합기 제어, 점화와 배출물의 후처리에

관한 장치의 기술적 발전은 이 분야만의 개조에 의하여는 연료경제성과 배출물감소에 더 큰 효과를 기대할 수 없는 수준에 도달하였다. 또한 이 분야에 대한 전자장치의 도입은 높은 정밀도, 내구성 그리고 또 다른 엔진의 변수(노크, 배기가스 재순환(EGR), 불규칙 운전조건)를 제어할 수 있는 잠재력 때문에 크게 관심이 집중되고 있다. Porsche 社의 경험에 의하면 전자적 제어장치를 갖는 엔진은 기계적 제어를 하는 엔진보다 연료경제성면에서 2~3% 우수하다는 것이 입증되었다.

연료소비율을 15~30% 정도 감소시키기 위하여는 엔진설계에 있어 그 목적을 최대한 효율을 얻는데에만 집중시켜야 가능하다. 새로운 엔진의 개발에 있어 설계변수(design parameter), 즉

- 배기량
- 실린더 수
- 압축비
- Stroke/bore 비
- 연소실의 layout

이 실제 엔진의 특성에 결정적 역할을 하며 이들은 배출물감소효과를 향상시키는 방향으로 선택되어야만 한다. 내연기관의 특성은 연소 과정에 크게 좌우되므로 엔진의 핵심인 연소

* Central Section Meeting / Combustion Institute, Warren, Michigan (1981) 에 발표됨.

실의 설계는 이러한 면에서 가장 중요한 위치를 차지한다.

내연기관의 발전과정에 있어서 연소실의 형상은 주로 연소효율을 제고시키는 방향으로 많은 연구가 수행되어 왔다. 그러나 이 분야에 대한 집중적인 연구에도 불구하고 Otto 엔진의 연소실 설계에 있어서 일반적으로 적용 가능한 안전한 개념은 수립되어 있지 않다. 반면 오늘날의 승용차용 Diesel 기관에 있어서는 연소실 형상에 대한 확고한 형식이 존재하고 있다. 현재 생산되고 있는 승용차용 Diesel 기관의 대부분은 Ricardo-Comet Mark V Swirl Chamber (Fig. 1)에서 유래되는 Swirl Chamber System을 채택하고 있다. 이러한 연소실 형상은 승용차용 Diesel 기관에 적합하다는 것이 입증되었다. 많은 종류의 엔진에서 사용되는 Swirl Chamber, orifice의 크기, 그리고 압축비 등의 변수들은 매우 유사한 값을 갖는다. 이러한 연소실 형상 때문에 엔진의 중요한 특성 데이터들은 미리 결정되며, 엔진 상호간의 특성변수값들의

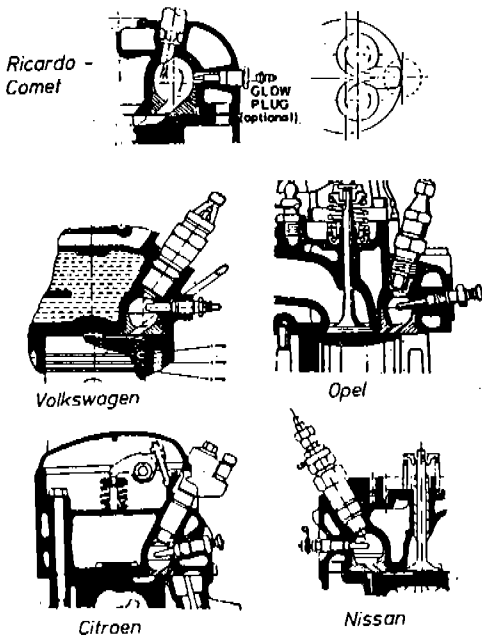


Figure. 1. Combustion Chamber Design of different Diesel-Engines

산포도는 매우 작다. 그러나 SI 엔진의 경우 연소실의 layout에 있어 보다 많은 형태가 존재하고 있다(Fig. 2). 생산 가능성, 성능의 요구조건과 연료의 성질의 상이성에 의하여 서로 다른 형상의 연소실이 개발되었으며, Fig. 3에 나타난 바와 같이 중요한 특성변수값의 산포도가 Diesel 기관보다 더 크다.

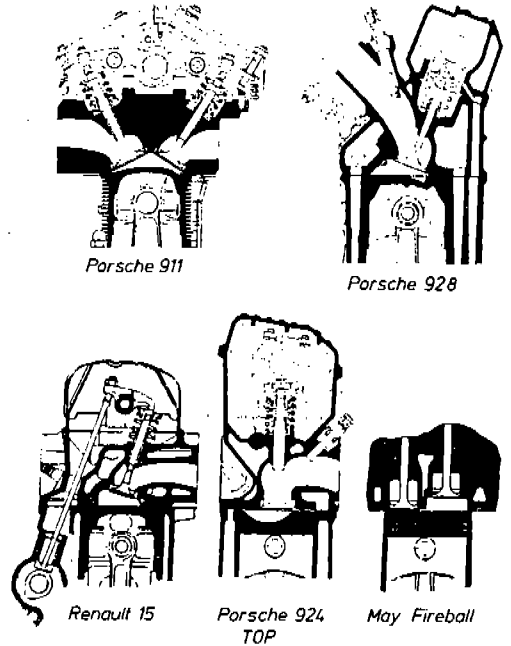


Figure. 2. Combustion Chamber Design of different Otto-Engines

2. 역 사

이미 엔진의 초기발전단계에서부터 연소과정에 대한 연소실 형상의 영향이 많이 연구되었다. 1919년 Ricardo는 "turbulent head"라는 실린더 헤드에 관한 특허를 출원하였다. 이 연소실의 개념은 다음과 같은 아이디어에 기초를 두고 있다.

- 연소속도를 증가시키고, 엔진의 점화시기에 대한 영향을 감소시키기 위하여 압축행정시 부가적인 난류를 발생시킨다.
- spark plug에서부터 연소실의 가장 먼

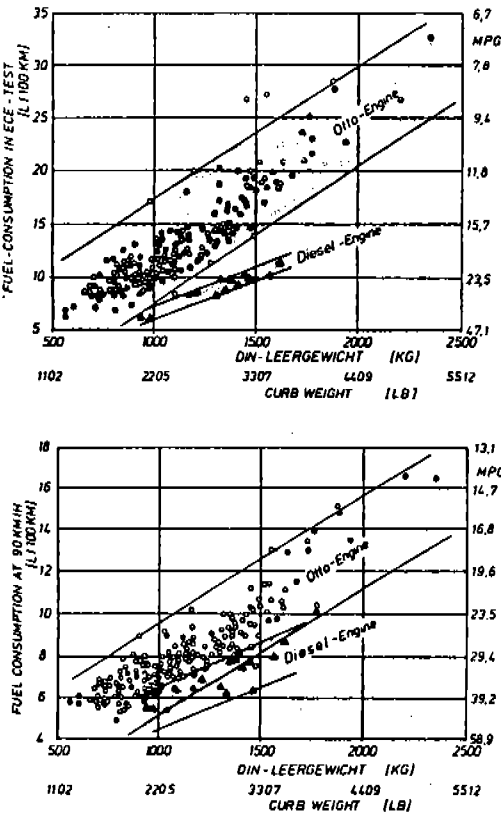


Figure 3. Curb Weight and Fuel Consumption of Otto- and Diesel- Engines

위치까지의 화염전과거리를 단축시킨다.

- Spark plug 를 중앙에 위치시킨다.
- 연소실의 표면적/체적 비를 최소화시켜, 연소기간중의 열손실을 줄인다.

1929년까지 이러한 연구결과에 기초하여 60종 이상의 서로 다른 형상의 연소실에 대한 실험이 단기용 연구용 엔진에서 수행되었다. 이 연구의 목적은 연소실의 형상, 압축비, 흡기와 압축행정시의 난류발생, Spark plug의 위치, 정상연소와 노크연소시의 quench distance에 관한 영향을 살펴보는 데 있었다. Figure 4는 실험된 연소실중 그 일부를 보여주고 있다. 이러한 개발에 따라 압축비가 C. R.=4.8에서 7.0으로 높아졌으며 엔진출력이 15% 정도 향상되었다. 이때 사용된 연료의 옥탄가는 RON = 50 ~ 60 정도였다.

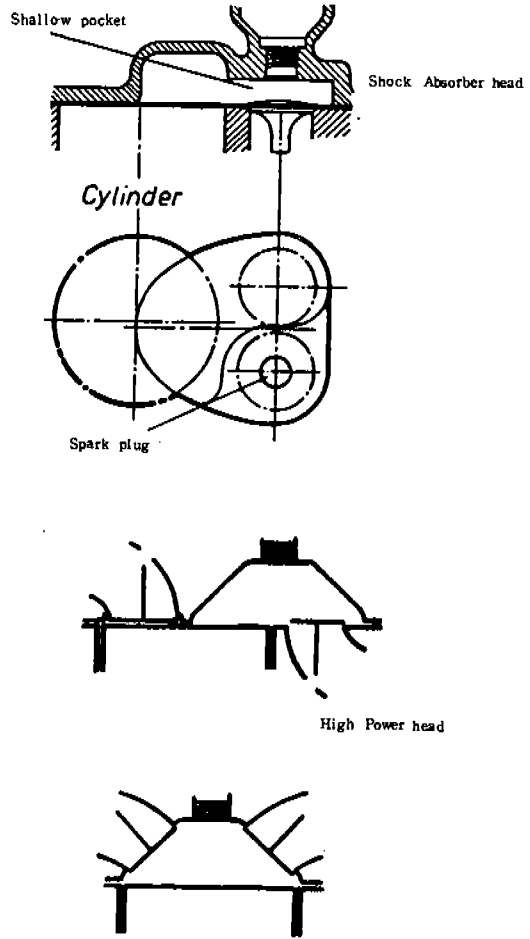


Figure 4. Combustion Chamber Variants. Ricardo Investigations 1929.

그후 30년간의 주된 발전은 새로운 연료의 개발과 점진적으로 증가되는 옥탄가에 맞추어 연소실을 개량(예를 들어 압축비)하는데 있었으며, 이에 따라 비출력과 노크방지성능이 향상된 많은 개발품들이 생산되었다.

Ricardo의 기초적인 연소실의 개념에 관한 연구가 완료되어, 1945년에는 그때까지의 알려진 사실에 의거하여 출력과 연료소비율의 관점에서 최적압축비가 12.5 정도로 생각되었다.

50년대 후반의 연구는 높은 옥탄가의 연료를 요구하는 성향을 줄일 수 있는 연소실의 설계에 집중되었다. 직접분사식 Diesel 기관에서

유래하여 연소실을 피스톤 크라운에 위치시키는 방식은(Fig. 5) 좋은 효과를 거두었다. 그러나 피스톤 크라운에 연소실을 둔 엔진은 비

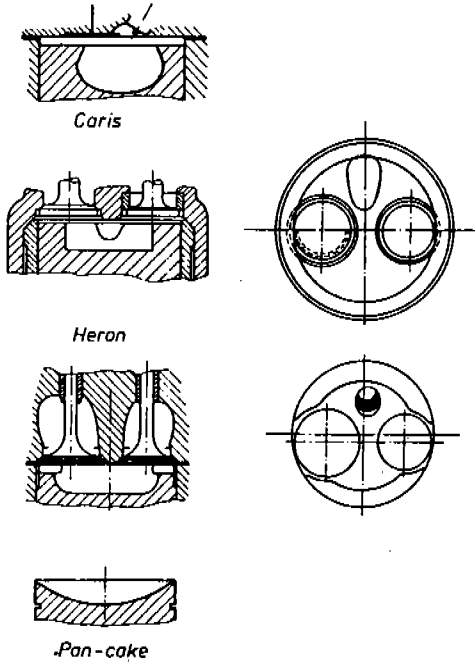


Figure 5. Combustion Chamber design (piston bowls)

교적 비출력이 작고 동시에 열적 문제가 발생하여 더 이상의 발전은 없었다.

60년대에는 Fig. 6과 같이 연소실이 wedge 형태이며 이를 실린더 헤드에 장치하는 방식이 승용차용 엔진에 많이 채택되었으며 압축비가 C.R. = 10.5 까지 되었다.

3. 배기가스규제와 연소실 형상

60년 후반과 70년대초에 시작된 유해배출물의 규제조치로 인하여 CO, HC, NO_x들이 생성원인 연소실에서 억제하려는 연구가 시작되었다. 오래지않아 비출력과 연료경제성을 향상시키기 위하여 고안된 연소실의 제반특성이 유해배출물의 생성에 나쁜 영향을 미친다는 사실이 밝혀졌으며, 또한 단지 연소과정의 기

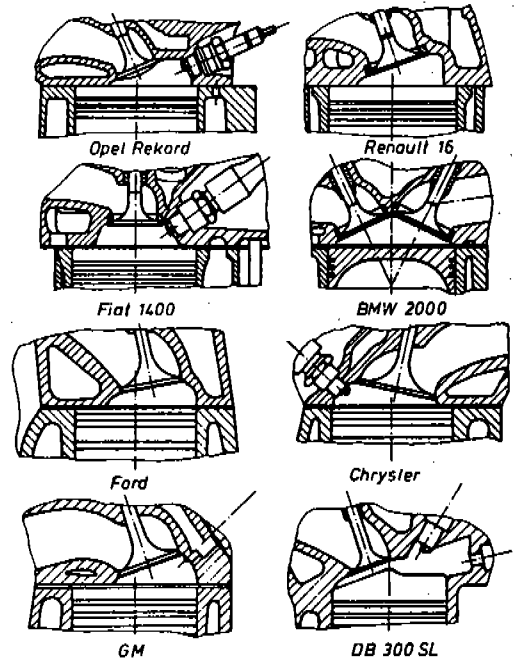


Figure 6. Combustion Chamber Shapes of Otto Engines in the sixties

량만으로는 배출물의 법적규제치를 통과한다는 것이 불가능하다는 것도 알려졌다.

비교적 효율이 낮은 초창기의 배출물 후처리장치가 도입되었을 때에는 촉매계의 효과적인 작용조건을 맞추기 위하여, 연소효율의 축소조정이 불가피하였으며, 결과적으로 quench area가 작고, 압축비가 작은 비교적 큰 직경의 연소실이 도입되었다. 위와 같은 형태의 연소실은 표면적/체적의 비에는 좋은 영향을 미쳤으나, 반면 연소가 지연되고, 화염 전파속도가 감소하여 배기온도가 상승하는 결과를 가져와서, 비출력과 연료경제성의 감소를 초래하였다.

연소과정을 조정함으로써 유해배출물을 억제하고 연료경제성을 향상시키려는 계획은 포기되지 않았으며 가장 좋은 방법은 연소실의 layout로 생각되었다. 그리하여 일련의 새로운 연소실이 개발되었으며, 그중 층상급기(stratified-charge) 방식이 가장 전망이 좋은 것으로 알려졌다. 위와같은 목적으로 개발된

연소실에서 희박혼합기의 점화와 연소에 적합한 조건을 얻기 위해 연료경제성이 좋고 비교적 비출력이 좋으면서도 HC, CO, NO_x가 적은, 분리 또는 비분리형 연소실 (divided or undivided combustion chamber)이 개발되었다. (Fig. 7).

있다. 또한 혼합기조절, 점화 그리고 배출물 처리에 관한 최근의 발전은 종래의 엔진을 이용하여 층상급기엔진을 사용하는 것 보다 훨씬 저렴한 가격으로 요구조건을 만족시켜줄 수 있게 되었다.

4. 미래형 엔진에서의 연소실의 layout

수많은 연구와 예측에도 불구하고 앞으로도 전형적인 형태의 왕복동 엔진이 차량의 구동 장치로서 주류를 이룰 것이다. 즉 내연기관설계의 기본적인 개념에 있어서의 큰 변화는 없을 것이며, 이미 알려진 엔진설계의 기본적인 특성이 그대로 사용될 것이다. 연소실 형태의 발전은 비출력과 생산단가, 그리고 연료경제성 등의 적절한 절충에 의하여 최대의 효과를 거두는 데 집중될 것이다. 연료소모를 줄여 기관의 효율을 향상시키는 것이 장래 엔진개발의 가장 중요한 인자가 될 것이다.

다가올 세대의 기관은 비교적 높은 압축비와 희박한 공연비에서도 노크가 발생하지 않는 연소실을 장치할 것이다. Figure. 9는 연소실의 형상과 연료의 성질이 SI 기관의 작동상태에 미치는 영향을 보여주고 있다. 급기시 난류강도가 약한 연소실은 왼쪽 그림과 같이 SI 기관의 작동범위가 매우 제한되어 있다. 낮은 압축비에서는 공기과임지역에서의 화염전파특성이 만족스럽지 못한 반면, 높은 압축비에서는 노크가 발생하므로, 희박작동한계와 노크한계사이에 있는 작동범위가 매우 좁다. 그러나 급기시 연소실의 난류강도를 증가시키면 엔진이 안정적인 작동을 할 수 있는 조건을 얻을 수 있다. 강한 난류강도에 의하여 노크한계가 보다 높은 압축비쪽으로 이동하며, 동시에 강한 난류강도와 고압축비의 영향에 의하여 혼합기의 희박한계가 향상된다. 그러므로 적절한 압축비의 선택은 연료의 성질, 연소실의 특성 그리고 실린더 직경등과 깊은 연관이 있다. Figure.10은 premium gasoline 을 사용하였을 때의 실린더보어와 최적압축비의 관계를 보여주고 있으며, 그림의 빗금친 부분은 스

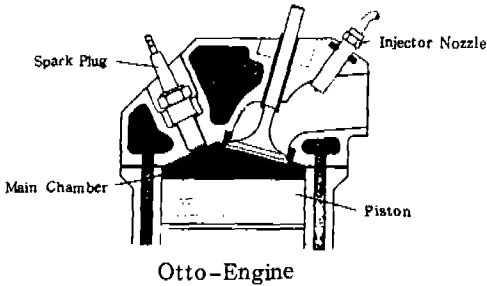
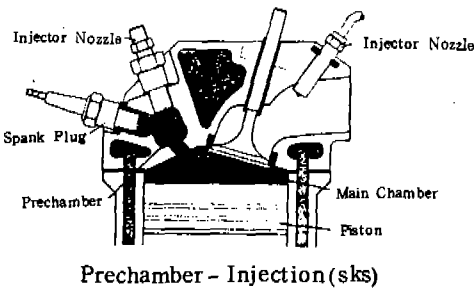
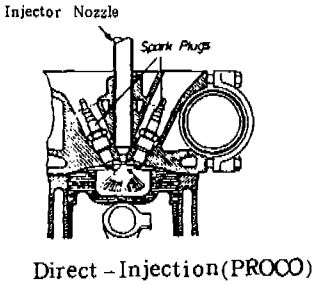


Figure. 7. Combustor Shapes of Stratified Charge and Otto engines

층상급기 엔진을 이용하여, 예상된 성과의 일부가 달성되었지만 이러한 형태의 엔진은 생산측면에서는 성공하지 못했다 (Fig. 8). 오늘날까지 냉간시동시의 HC의 과다배출과 서로 다른 운전조건하에서의 정확한 연료와 공기의 주입 같은 문제점은 아직 해결되지 않고

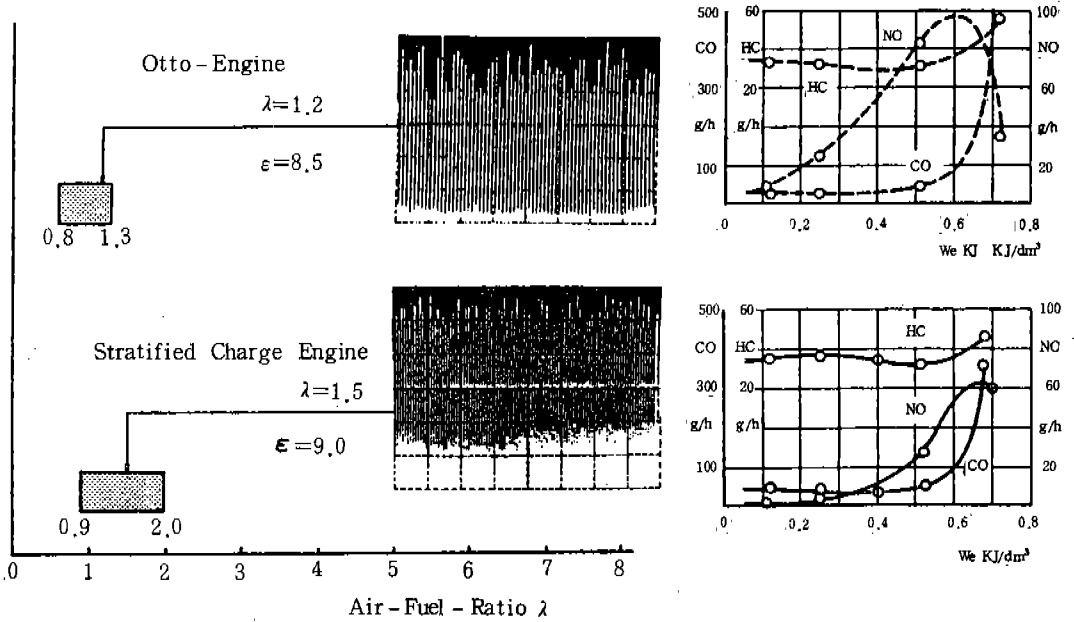


Figure. 8. Air-Fuel ratio, cycle by cycle variation and exhaust emission of Otto- and stratified charge - engine

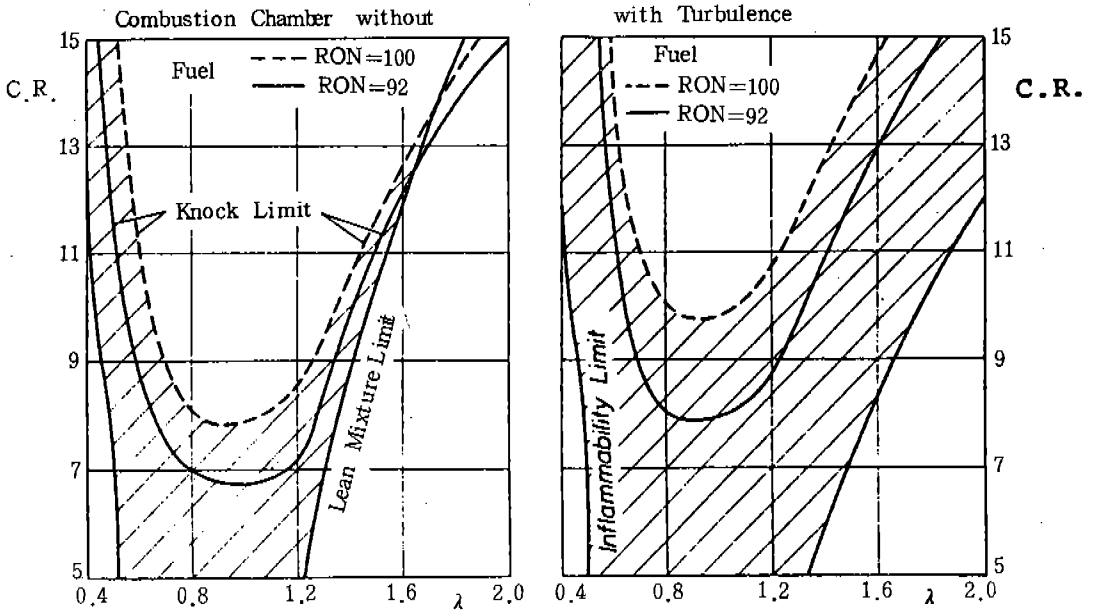


Figure. 9. Influence of the Combustion Chamber Shape and Compressive Ratio on the Lean and the Knock Limit

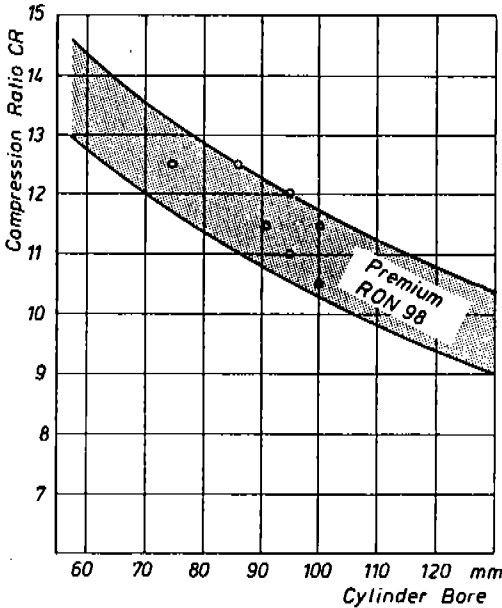


Figure. 10. Influence of Cylinder Bore on optimum Compression Ratio of S.I. Engines

파크 플러그의 설치, 화염의 전파특성과 난류 강도 등에 의한 연소실 특성의 영향을 나타낸다. 안정적으로 기관이 작동할 수 있는 가장 효과적인 난류생성방법, 즉

- 흡기행정시 흡기다기관에 의한 난류생성
- 압축행정 후반부의 연소실 형상에 의한 난류생성

중 어느것이 우수한지는 아직까지도 연구의 대상이 되고 있다. 경험에 의하면 높은 압축비를 사용하는 SI기관의 개발에는 연소실 형상에 기인한 난류생성이 보다 중요하다는 것이 알려졌다. 연소실 내의 적절한 quench 지역의 설정과 그에 상응하는 quench distance의 설계에 의하여 혼합기의 점화시 비교적 강한 난류가 생성되어 주 연소시에 보다 향상된 연소특성을 얻을 수 있다. Figure.11은 최근 승용차용 엔진에서 사용되고 있는 연소실의 형태를 보여주고 있다. 그러나 연소실의 위치에 관한 일반적인 원칙은 아직 존재하지 않는다. 연소실을 설치할 수 있는 위치는 실린

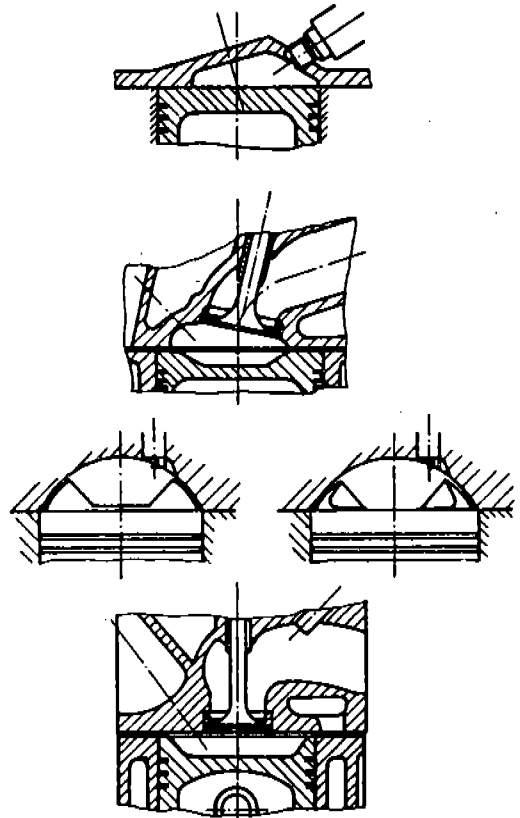


Figure. 11. Development of new Combustion Chambers

더 헤드, 피스톤 크라운 그리고 둘의 사이에 설치하는 3종류가 있다. Porsche의 단기통 연구용 기관에서 수행된 연구는 피스톤 크라운에 위치시킨 연소실이 현재 일반적으로 사용되는 실린더 헤드에 있는 연소실보다 여러 요구조건에 보다 잘 부합되는 것을 보여주고 있다. 피스톤 크라운의 연소실은 스파크 플러그의 선정과 quench area의 설정면에서 보다 엔진을 소형화시키기 쉽고, 작은 옥탄가의 연료를 사용가능하며, 혼합기를 희박화하기 좋으며, EGR 효과에 덜 민감하다(Fig.12). 또한 이러한 형태의 연소실은 15%까지의 EGR을 했을 때 연료경제성의 손상없이 NO_x 배출의 50~70%를 감소시켰다. 또한 유동의 특성을 고려하여 적절한 밸브의 크기를 선택하

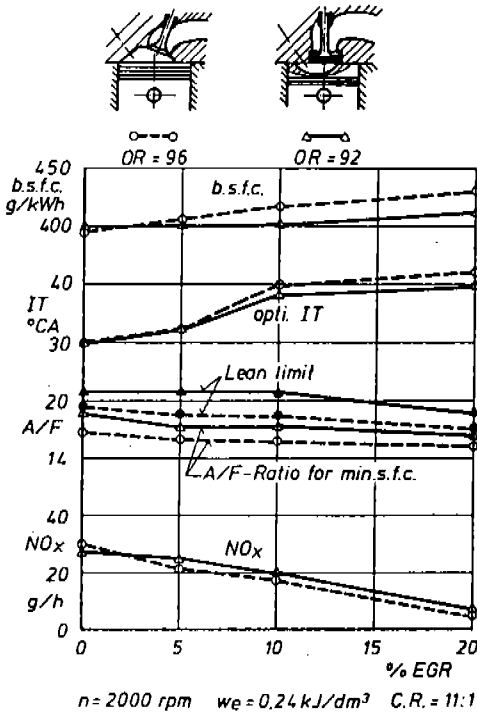


Figure. 12. Influence of the Combustion Chamber Shape on part load performance

면 동일한 엔진에서 실린더 헤드에 위치시킨 연소실과 비교하여 피스톤에 위치시킨 연소실은 6,000rpm 까지 제적효율이 동일하여, 출력의 감소가 발생하지 않는다. 단기동 엔진에서 연소실 형상의 최적화에 관한 경험을 바탕으로 Porsche 사의 924 생산엔진에 대해 열역학적인 최적화를 통해 압축비 $C.R. = 12.5$ 인 924 TOP 엔진이 설계되었다 (Fig. 13). 이 TOP 엔진 개발의 주된 목적은 생산엔진의 최대출력을 손상시키지 않고 부분부하에서 열역학적 최적화의 잇점을 얻는데 있었다. 이러한 요구조건은 부하 및 속도의 전범위에서 공연비와 점화시기를 조절함으로써 만족시킬 수 있었다. Fig. 14는 924 TOP 엔진과 생산엔진의 출력대비를 보여주고 있으며 924 TOP 엔진은 6,000 rpm에서 $P_e = 97 \text{ kW}$ 의 최대 출력을 나타낸다. 정상운전조건하에서 TOP 엔진은 생산엔진에 비해 부하와 속도에 따라 5 ~ 30 %의 연료절감효과를 나타내었다.

연소실 layout의 새로운 전망은 4-밸브 연소실에 있다. 단기동 엔진의 연구결과에 의하면, 연소실의 형상, 밸브의 개폐시기와 압축비를 정확히 조절하면 4-밸브 시스템은 다

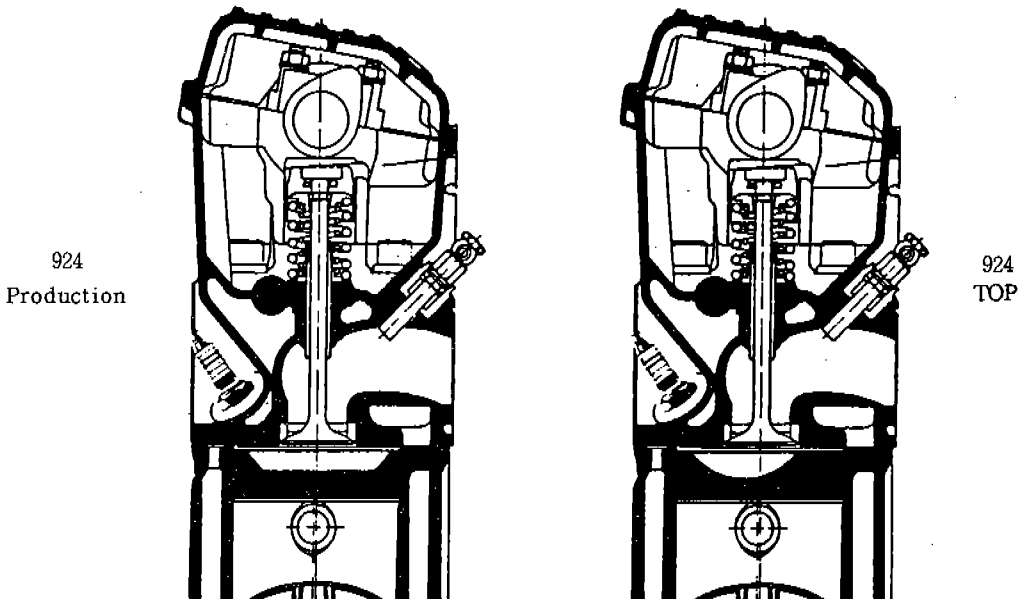


Figure. 13. Combustion Chamber Shape. 924 production and 924 TOP engine

른 형태의 연소실보다 연료소비율 뿐만 아니라 HC와 NOx의 배출을 상당수준으로 줄일 수 있다 (Fig. 15). 그러나 이와같은 엔진의 개발은 높은 생산단가를 초래할 것이다.

5. 요약

점차 엄격해지는 요구조건을 만족시켜 주기 위해서는 승용차용 엔진의 실제특성과 운전특성을 지배하는 설계변수의 조절은 불가피하며, 그중에서도 엔진의 핵심부인 연소실의 설계는 가장 중요하다.

부분 부하에서의 SI 기관의 연료경제성을 향상시키는 가장 좋은 방법이 압축비를 상승시키는 것이므로, 앞으로의 연소실은 고압축비에서도 옥탄가가 높은 연료를 요구하는 성향을 낮추는 특성을 갖고 있어야 한다. 새로운 엔진의 형상을 최적화하기 위하여는 quench area의 크기와 위치 그리고 적절한 quench distance의 설정이 중요하며, 또한 연소실의 소형화, 스파크 플러그의 위치, 표면적/체적의 비 그리고 화염전파거리등도 고려에 넣어야 한다.

승용차용 엔진의 요구조건은 연소실을 피스톤 크라운에 위치시키는 용이한 방법을 통하여 해결될 수 있으며, 이러한 형상의 연소실은 실린더 헤드에 장치한 연소실과 비교하여 다음과 같은 장점을 갖고 있다.

- 스파크 플러그 주변에 연소실을 배치하기 쉽다.
- 연소실 내에 quench area의 설정이 자유롭다.
- 연소실 layout의 개조없이 압축비의 설정이 자유롭다.
- 연소실의 조합이 간단하다.
- 실린더벽으로의 열손실이 감소되어 열효율이 증대된다.
- 공연비의 회박가능한계가 크다.
- EGR 성능이 향상되어 NOx의 배출과 연료소비율이 감소된다.
- 필요하다면 연소실식 또는 직접분사식 Diesel 기관으로의 개조가 간단하다.

만약 생산단가가 크게 상승하지 않는다면, NOx의 배출과 연료소비율이 작으면서도, 비출력이 큰 4-밸브 연소실이 실용화 될 전망이다.

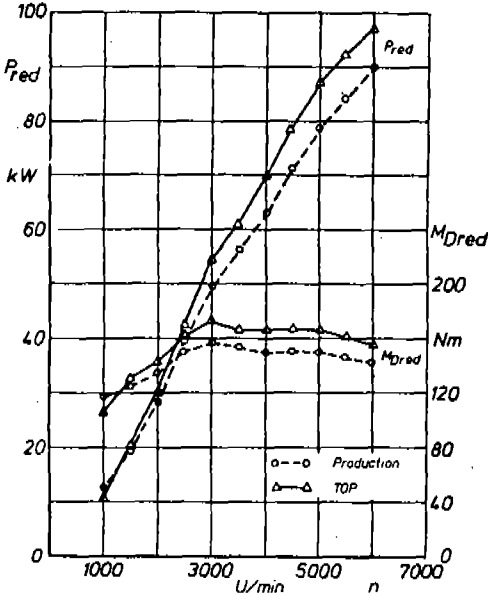


Figure 14. Comparison of the Power Output

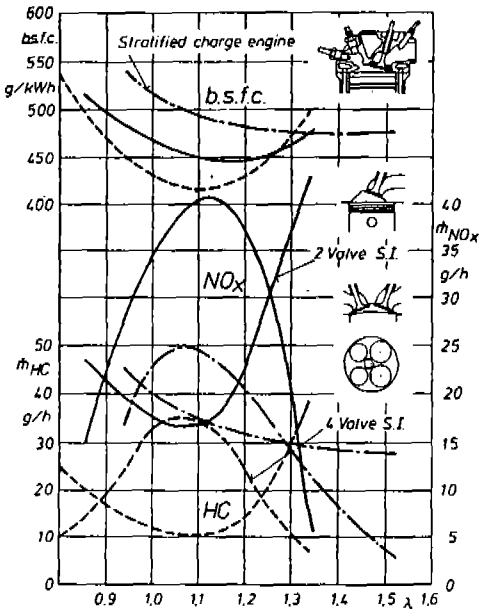


Figure 15. Influence of Combustion Chamber Layout on Fuel Consumption and Exhaust Emissions