

자동차용 2-행정 디젤엔진 연구 현황과 장래



정 용 일 (KIMM 동력시스템연구부)

- '70-'77 서울공대 공교과 자동차전공(학사)
- '82-'85 한국과학기술원 기계과(석사)
- '88-'93 미국 럿거스 뉴저지 주립대 기계과(박사)
- '79-'81 기아자동차
- '81-현재 한국기계연구원 책임연구원
- '87-'93 뉴욕사무소장

1. 기술현황

지구 환경문제가 세계적인 이슈로 등장하면서 저배기기술이 자동차 기술에서 가장 중요한 분야로 지목받고 있고, 더욱이 자동차 산업이 가장 중요한 기간 산업으로 자리잡고 있는 우리나라에서는 지속적인 자동차 선두 생산국으로의 도약과 GR에 대비하기 위해서는 저배기 기술의 확보가 필수적인 과제이다.

특히 1997년부터 새행되는 미국 캘리포니아주의 ULEV규제는 현 기술과는 다른 차원의 저배기 기술경쟁을 유발하고 있으며, 지금까지 자동차 동력의 주종으로 자리잡고 있던 4행정 기관에 대한 근본적 검토가 이루어지고 있다. 대체연료의 측면에서 CNG, LNG, 알콜, 수소연료 엔진 등이 거론되고 있고, 엔진·축전지, 엔진·flywheel 등의 hybrid 엔진도 연구되고 있다. 또한 ZEV를 위한 전기자동차, fuel cell, 태양전지 자동차 등도 강력한 후보로 거론되고 있다.

특히 자동차 동력의 주종인 4행정 가솔린과 디젤엔진의 ULEV규제에 대비한 저비기 대책은 매우 어려운 상황에 직면하여 있으며, 현재 제시되고 있는 대체 기술로는 희박연소, lean NOx 촉매, filter trap, 고압연료분사 장치 등이나 이들 기술 완성에 대한 예측은 어려운 상황이다. 따라서 4행정엔진 대체에 가장 근접한 위치에 있으면서도 기본원리면에서는 유리하나 세부 기술면에서 해결하기 어려운 문제가 많았던 2행정엔진에 대해 지금까지 발전하여 온 엔진 기술을 바탕으로 새

로운 각도에서 가능성을 검토하고 있다.

2-행정 가솔린엔진은 호주의 Orbital 엔진을 중심으로 발전하고 있으며 국내 자동차 회사에서도 이미 연구를 시작하고 있다. 그러나 2-행정 디젤엔진의 경우 도요다 자동차의 S-2엔진이 가장 가능성이 있는 것으로 평가되고 있으나 국내 자동차 회사에서는 아직 이에 대한 기술적 검토를 하지 못하고 있다.

2-행정 엔진기술은 4-행정 엔진에 비해 20년은 뒤져 있다고 보고 있으며 이것은 다시말하면 2-행정 엔진 기술은 새롭게 시작하고 있으며(new generation of two-stroke engine) 아직도 개선해야 할 것과, 할 수 있는 여지가 많다는 것을 의미한다. 또한 거의 한계에 와 있다고 생각되는 4-행정 엔진기술을 뛰어 넘을 수 있는 가능성도 있다고 생각하고 있으며, 지금까지의 엔진기술을 활용하면 10년 이내에 4-행정 엔진기술을 추월할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 만약 2-행정 엔진기술이 4-행정 엔진기술을 능가 하거나 동등한 기술수준이 되면 2-행정 엔진의 현저한 장점으로 인하여 자동차엔진 시장의 판도는 크게 바뀔 것으로 예상된다.

아직까지 2-행정 엔진은 motor cycle, 보트, scooter 등에 대부분 사용되고 있으며 자동차용으로의 시도는 그야말로 시작에 불과 하다. 2-행정 엔진 기술의 큰 주류를 보면 연소실내 연료 직접분사 방식을 채용한 Orbital의 기술로서 미국의 Ford와 GM 자동차가 연구에 열중하고 있으며, 유럽은 IFP, AVL 등의 연구소와 VW, 르노 등의 자동차 회사들이 관심을 보이고 있다. 이 방식은 기존의 2-행정 엔진 기술을 개량한 crankcase scavenging 이나, port scavenging(uniflow 등) 방식으로서 오일소모 과다와 내구성(durability)의 근본적인 문제는 그대로 안고 있으며, 주로 가솔린 엔진의 연구에 집중되고 있다.

한편, 2-행정 디젤엔진의 경우 도요다 자동차의 S-2 디젤엔진이 가장 가능성이 높은 것으로 평가되고 있다. 이 기술은 기존의 2-행정 엔진기술의 연장선에 있는 개념이 아니라 종래의 4-행정 엔진기술을 2-행정 엔진으로 접목하는 새로운 접근 방식이며, 따라서 2-행정 엔진의 근본적인 문제

점들의 많은 부분이 해결되었으며, 현재도 4-행정 디젤엔진에 비해 기술적으로 뒤지지 않는 수준이라고 자신하고 있다. 소기시스템의 기본 개념은 Ricardo의 Flagship과 유사한 면이 있으나 실용화 기술 면에서 앞서 있다고 볼 수 있다.

다시 말하면 4-행정 엔진에 비해 20년 이상 뒤져 있다고 볼 수 있는 2-행정 엔진기술에서 도요다 자동차의 S-2 디젤이 가장 앞서 있다고 볼 수 있다. 도요다에서도 S-2 디젤엔진 자체의 기술은 상용화 수준에 와있다고 판단하고 있으나 양산을 위한 설비투자 및 제조기술 부분에서 망설이고 있으며 현재의 일본 경기 때문에 양산투자 판단을 유예하고 있는 실정이다. 이미 2.5L급 S-2 디젤엔진을 개발해 놓고 있으며 계속해서 1.2L급 소형 디젤엔진의 개발에 착수했다.

이상에서 살펴본 바와 같이 2-행정 디젤엔진의 장래는 타 방식의 엔진에 비해 밝으며 기술개발을 집중할 경우 2000년대 자동차용 엔진의 주종으로 부상 할 가능성이 있다. 현재까지는 낮은 관심과 투자로 다른 엔진에 비해 개발수준이 낮은 것이 사실이지만, 세계적인 관심이 되고 있는 자동차 배기문제의 해결을 위하여 2-행정 디젤엔진이 진지하게 재검토 되고 있어 2-행정엔진의 재발견이란 표현이 사용되면서 2-행정 엔진이 강력한 연구분야로 새롭게 부상되고 있다.

2. 회사별 기술특징

2.1 Orbital 엔진

1986년 Orbital 1.2L3 2-행정 가솔린엔진이 발표되었으며 1989년에 1.0L3과 2.8V6이 계속 개발되었다. 1992년에 포드자동차의 Fiesta 25대에 1.2L3 엔진이 탑재되어 시험운행을 시작했으며 엔진 flexibility가 우수하고 운전이 유연하며 동일급의 4-행정엔진에 비해 연비가 10-12% 향상되었다고 보고되고 있으며 이 엔진의 전개성능은 80hp/5500rpm, 12.4kgm/4000rpm이다.

Orbital 엔진의 기본 작동은 reed 밸브를 사용한 크랭크케이스 흡입 방식이며 실린더 벽면 port를 통한 흡배기 방식으로 종래의 2-행정엔진의 개

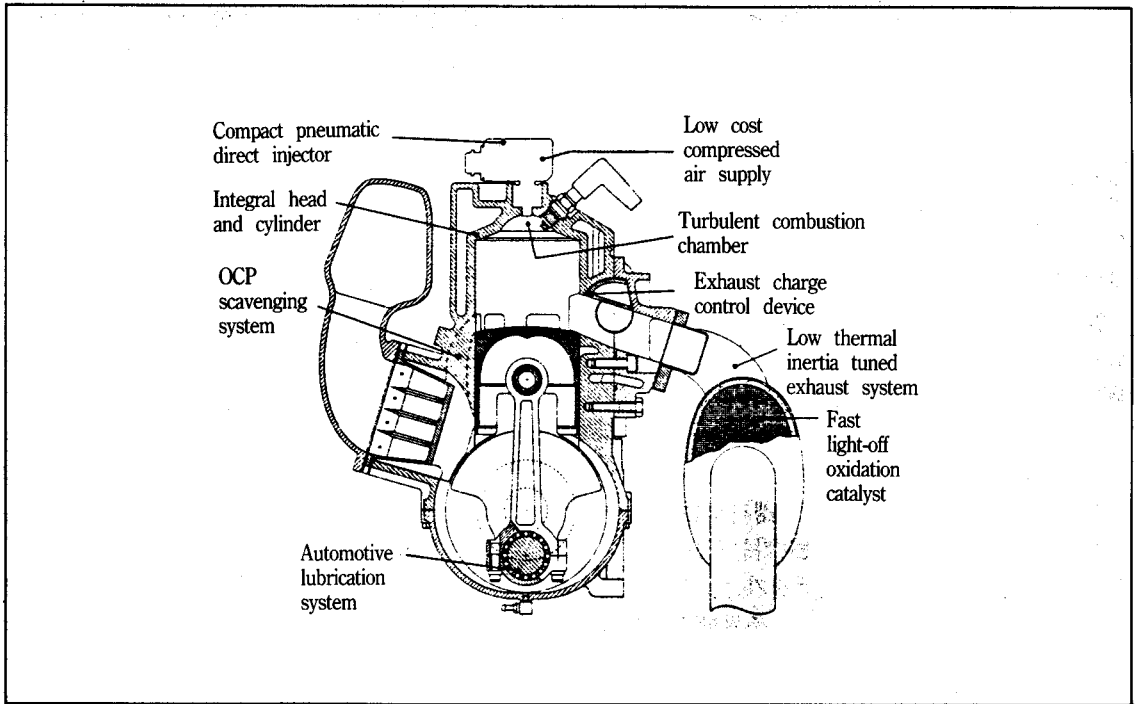


그림 1. Orbital 1.2L3의 기본구조도

조라고 할 수 있다. 기본 구성은 연소실 직접분사, dry-sump, 공압이용 연료분사 인젝터, 배기포트 타이밍 가변기구, HC oxidation catalyst matrix converter 등이다. (그림 1)에 Orbital 1.2L3의 구조를 보이고 있다.

2.2 도요다 S-2 엔진

S-2 엔진은 Supercharged 2 stroke의 약칭으로 blower를 사용한 외부소기 방식을 사용하고 있으며 가솔린과 디젤엔진의 2종류가 있다. 중요한 특징으로는 1) 기존의 2-행정엔진 기술의 연장이 아닌 4-행정엔진의 기본기술과 구조를 사용하고 있으며 2) Poppet 밸브로서 흡배기계를 구성하고 있다. 기존 2-행정 사이클에 대한 경험이 없기 때문에 4-행정 사이클의 기술과 노하우를 바탕으로 출발했다고 할 수 있다.

1989년 3.0L6 S-2 가솔린엔진과 2.5L4 S-2디젤 엔진이 발표되었으며, 2-행정 디젤엔진의 경우 와류실식 연소실에 흡배기 각 2-valve 직립식을

사용했으며 roots blower scavenging 방식을 채용하여 100PS/3200rpm, 284 Nm/1600rpm 출력성능을 보인다. Poppet 밸브를 채용함으로써 오일소모를 억제해주고 충전효율 향상과 흡배기 타이밍의 설계 자유도를 높이고 소기효율을 향상시킬 수 있는 등 상당한 이점을 가지고 있다.

S-2 엔진의 장점으로는 고온의 잔류가스에 의한 EGR 효과에 의한 NOx 배출이 비슷한 4-행정 디젤엔진에 비해 1/3 수준으로 감소하고 배기량당 토크크가 40% 향상되며 또한 토크 변동도 적다. 특히 S-2 디젤엔진의 경우 4-행정 디젤엔진에 비해 아이들링 진동은 80% 이상 감소되었으며 연소음도 정숙하다. 이와 함께 토크크가 높기 때문에 AT 사용에 유리하고 운전이 정숙하여 승용차용으로 개발하고 있다. 엔진회전수의 상한이 낮아(3500 rpm) 구동계의 고속작동에 따른 문제가 적으며 연료분사펌프도 구조를 크게 바꾸지 않고 배속만 하면 된다.

(그림 2)는 S-2 디젤엔진(2.5L4)의 구조를 보이고 있다.

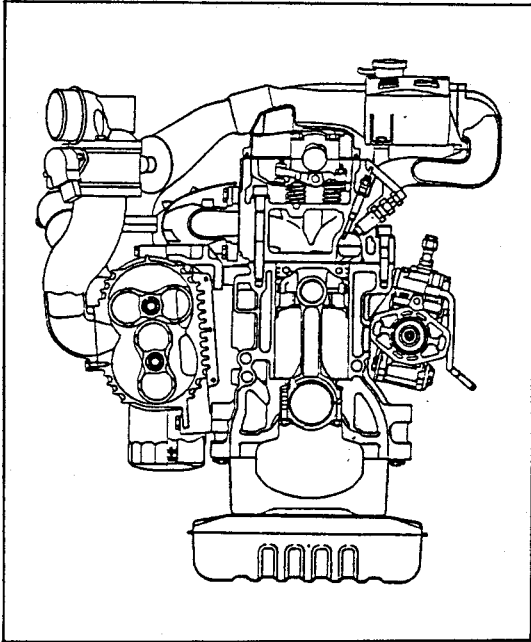


그림 2. S-2 디젤엔진의 구조도

2.3 AVL

AVL의 2-행정엔진에 대한 연구는 상당히 오래 전부터 진행되어 왔으며 여러가지의 소기방식에 대한 경험과 노하우가 집약되어 있다. 최근에는 폭스바겐과 함께 자동차용 엔진 개발에 참여하고 있으며, uniflow 방식의 1.15L3, 최고출력 60hp/4000 rpm인 prototype 엔진을 개발하여 놓고 있으나 구체적인 규격이나 특징이 아직 발표되지 않아서 현재로서는 자세한 장단점을 파악하기는 어렵다.

3. 2-행정엔진 소기시스템

2-행정엔진은 소기(scavenging)유로에 따라 일반적으로 횡단(cross)소기식, 유니플로(uniflow)소기식, 루우프(loop)소기식, 역루우프소기식으로 구분된다. 또한 압축공기를 공급하는 충전(charging)방식으로 크랭크케이스(crankcase)압축, 터보차저(turbocharger), 슈퍼차저(supercharger), 터보인터쿨러(turbo-intercooler) 방식 등이 있다. 또한 소기 및 배기가스 통로방식에 따라 포트(port)방식과 포핏밸브(poppet valve)방식으로 구분되며 유회방

식으로는 건식(dry)과 습식(wet)의 두종류로 나누어진다. 이상으로 살펴본 방식들은 서로 혼합되어 설계되며 각각 다른 특징과 장단점을 갖고 있다.

횡단소기식은 (그림 3)에서 보는 바와 같이 소·배기 구멍이 실린더 하부에 대칭으로 위치하기 때문에 소기 통과손실이 많고, 소기효율이 나쁘나 구조가 간단한 장점으로 인하여 소형기관에 많이 사용되고 있다.

루우프소기식도 대칭소기의 결점이 있으나 횡단소기식에 비해 소기효율이 높다. 그러나 이 방식은 소기구멍 면적을 충분히 잡을 수 없는 구조적 제한을 갖고 있다.

유니플로소기방식은 소·배기 혼합이 적고 소기효율이 높으며 비대칭 소기형으로 후급기를 할 수 있고 소·배기 구멍을 실린더 원주에 만들 수 있어 구멍의 높이를 낮게 함으로서 유효행정을 적게할 수 있는 장점이 있어 소기방식으로는 가장 좋은 방식이나 구조가 복잡한 결점과 포터방식의 문제점을 함께 갖고 있다.

역루우프소기식은 포핏밸브방식에 사용되며 소기시스템 개선을 위한 연구가 계속되어야 하고 구조가 복잡한 문제점이 있으나, 기존 4-행정엔진 기술을 대부분 그대로 접목하여 사용할 수 있고 포터방식의 구조적 결점인 유회과 내구성(durabi-

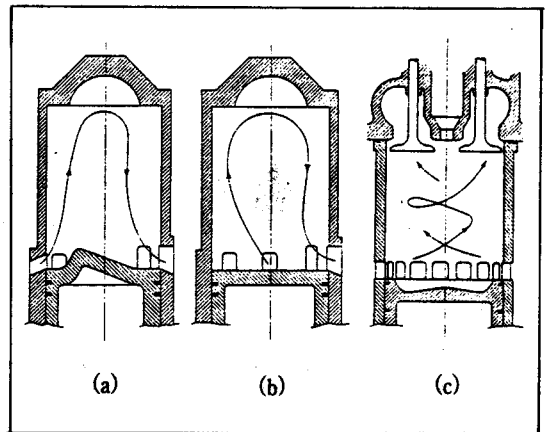


그림 3. 소기유로 방식

- (a) Cross-Scavenged,
- (b) Loop-Scavenged,
- (c) Uniflow-Scavenged Type

lity)을 특별히 다른 대책없이도 해결할 수 있는 등 자동차용 엔진으로 사용할 수 있는 장점이 많다. 특히 이 방식은 본 과제에서 대상으로 하고 있는 소기방식으로 일본 도요다 자동차의 S-2 엔진에서 채용하고 있으며 영국의 Ricardo와 일본의 Shibaura Institute of Technology에서도 상당한 연구가 진행되고 있다.

4. Poppet Valve Type 소기시스템의 연구현황

4.1 Ricardo의 Flagship Concept

영국 Ricardo의 Hundleby 등에 의해 Flagship 개념의 poppet valve type, 2-행정 가솔린엔진이 고안되어 1989년에 Flagship Hydra 엔진에서 첫 작동을 시작하였다. 엔진개발시 핵심되는 기술은 소기시스템(scavenge loop)이었으며, 고속밸브 구동시스템의 개발도 해결하여야 하는 큰 과제였다.

소기유로 방식은 역루우프소기(Ricardo에서는 reverse tumble scavenging loop로 표현)이며 소기시스템은 (그림 4)에서 보느냐와 같이 흡기관이 배기관과 거의 비슷한 방향으로 경사되어 있으며, 소기밸브가 열리면 대부분의 압축공기가 실린더 벽면방향으로 공급되어 역 텀블을 만들 수 있는 구조로 되어 있다. Top entry inlet port는 heavy valve masking이나 flow deflectors를 사용하는 경

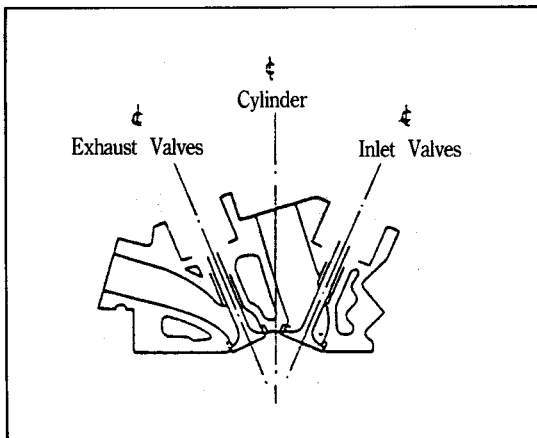


그림 4. Ricardo의 Flagship Concept

우보다 성능이 우수하다고 발표하고 있다.

밸브 구동시스템은 엔진이 최대 5000rpm(4-행정엔진의 10000rpm에 해당)까지 작동하는 것을 목표로 하고 있으며 따라서 내구성과 소음문제 등을 함께 해결할 수 있는 첨단 밸브설계기술을 도입하였다. 설계시 중요한 고려 요소는: (1) Mass of reciprocating valve train parts, (2) Stiffness of valve train, (3) Torsional stiffness of camshaft, (4) Cam design, (5) Spring design이다.

4.2 Toyota의 S-2 Engine

도요다 자동차의 S-2엔진은 Supercharged 2-stroke의 약칭으로 가솔린과 디젤엔진의 두종류가 있다. 소기시스템 개념은 동일하며 (그림 5)에서 보느냐와 같이 흡기관은 Ricardo Flagship 구조와는 반대방향으로 되어 있으면서 소기밸브가 열리면 실린더 벽면 쪽으로만 압축공기가 공급되도록 되어 있다.

1989년에 3.0L6 S-2 가솔린 엔진과 2.5L4 S-2 디젤엔진이 발표되었으며, 2-행정 디젤엔진의 경우 와류실식 연소실에 흡배기 각 2-valve 직립식을 사용하였다. 도요다 기술은 실용화에 거의 도달하였다고 볼 수 있으며 양산에 따른 문제점을

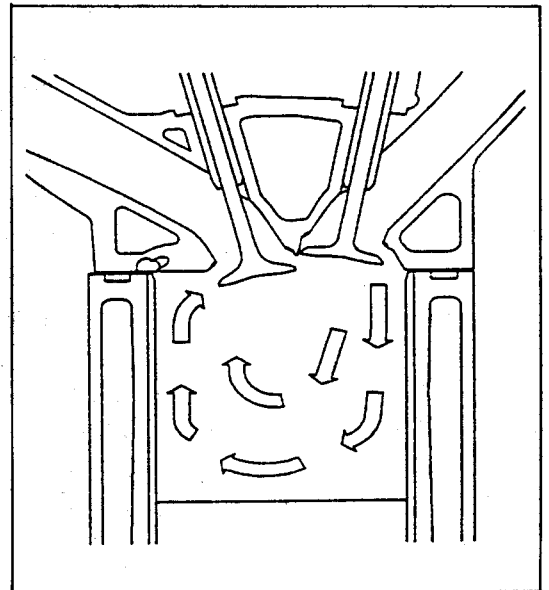


그림 5. S-2 엔진의 소기시스템

해결하고 있는 중이다. 도요다에서는 소형 승용차 탑재를 목표로 계속해서 1.2L 급 2-행정 소형 디젤엔진 개발에 착수했다.

앞에서도 언급하였듯이 2-행정엔진 기술의 완성을 위해서는 10년 이상의 기술투자가 계속되어야 하며, 이때에 가서야 4-행정엔진 기술을 넘어설 수 있는지의 확인이 가능하다. 따라서 도요다도 지속적인 성능향상 연구를 지속하고 있다.

4.3 Shibaura의 shrouded Valve

일본의 Shibaura Institute of Technology의 Sato등은 혼다자동차의 지원으로 shrouded valve(그림 6)와 deflector(그림 7)를 사용한 소기시스템을 연구하여 발표하고 있다. 이들 방법은 4-행정엔진의 스윙과 텀블 향상을 위하여 그동안 많은 연구가 되어오던 아이디어로서 2-행정엔진의 소기시스템에 응용한 것이다.

이 방법도 가능성이 있는 소기시스템으로 평가되고 있으며, 실용화를 위한 보완과 개선들이 계속되어야 할 것이다. 특히 본 시스템의 실용화에 가장 장애가 되고있는 소기밸브를 고정해야하는 문제를 해결할 수 있는 특허가 본 연구그룹에서 출원되었으며, 도요다 S-2 시스템과 함께 관심있게 검토할 시스템의 하나로 고려된다.

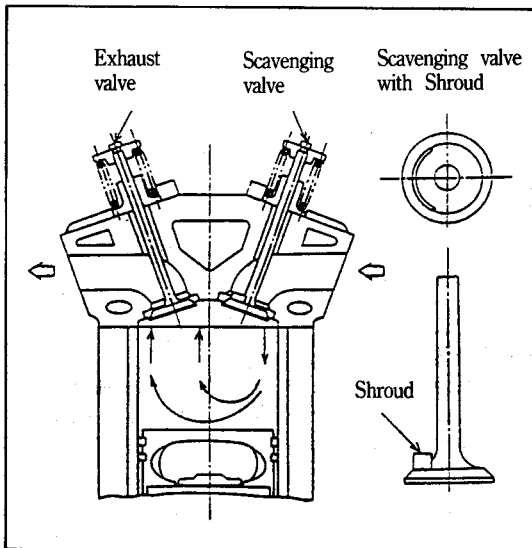


그림 6. Shrouded Valve System

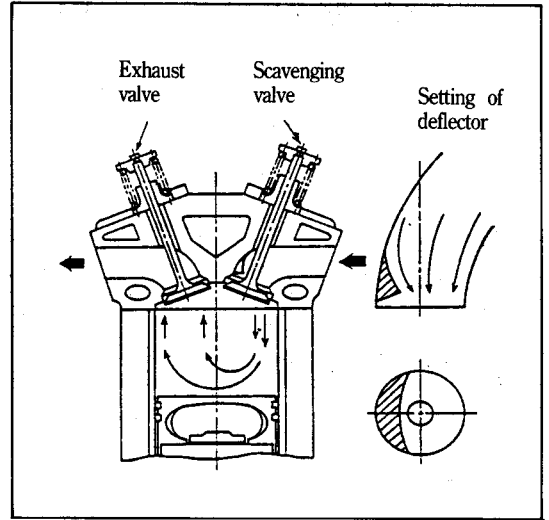


그림 7. Deflector System

5. 2-행정 디젤엔진의 장래와 대책

이상에서 살펴 본바와 같이 2-행정 디젤엔진의 장래는 2-행정 가솔린엔진과 4-행정 디젤엔진에 비해 밝다고 할 수 있으며 기술개발을 집중할 경우 2000년대 자동차 엔진의 주종으로 부상할 가능성도 있다. 물론 2-행정 디젤엔진의 기술이 완성되기 위해서는 많은 연구투자와 시일, 새로운 기술개발이 필요하며, 일부에서는 2-행정 엔진의 장래에 대해 "2-행정엔진의 장래는 Wankel 엔진의 장래와 같을 것이다"라는 등 부정적인 견해도 많다. 이와 같이 아직도 장래에 대한 견해들이 여러가지로 나타나고 있지만 도요다, 폭스바겐 등에서는 충분한 가능성을 예견하고 개발을 진행하고 있다.

세계적인 자동차 기술은 배기가스 문제를 회전축으로 하여 급속하게 변화, 발전하고 있으나 아직 까지도 ULEV 규제를 만족할 수 있는 해결방안이 제시되지 못하고 있는 실정이다. 또한 현 상황은 선진국에서 새로운 기술을 개발 하였을 경우 이 기술을 제때에 국내에 도입, 활용할 수 있으리라고는 예상하기 어렵다. 결국 저배기기술의 국내 고유기술 개발 없이는 이미 시작된 자동차 기술경쟁에서 살아남기 어렵다는 것은 분명하다. 2-행정 디젤엔진 기술은 자동차 기술에서 가장

큰 위치에 있는 기술로서 선진국으로 부터의 기술종속을 탈피하기 위해서는 이 분야에 대한 관심과 연구가 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Ph. Keribin, "Contribution of Scientific Tools and Computer Modelling to the Understanding of Two-Stroke Engine Aerodynamics and Direct Fuel Injection Behavior", IFP Seminar, Nov. 29-30, 1993.
2. K. Nomura and N. Nakamura, "Development of A New Two-Stroke Engine with Poppet-Valves : Toyota S-2 Engine", IFP Seminar, Nov. 29-30, 1993.
3. Masamitsu Nakano, Kazuo Sato, and Haruo Ukawa, "A Two-Stroke Cycle Gasoline Engine with Poppet Valves on the Cylinder Head", SAE Paper-901664, 1990.
4. Kazuo Sato, Haruo Ukawa, and Masamitsu Nakano, "A two-Stroke Cycle Gasoline Engine with Poppet Valves in the Cylinder Head-Part II", SAE Paper-920780, 1992.
5. Haruo Ukawa, Masamitsu Nakano, and Kazuo Sato, "A Two-Stroke Cycle Gasoline Engine with Poppet Valves in the Cylinder Head-Part III : An Application of Gaseous Fuel Direct Injection System", SAE Paper-930983, 1993.
6. Pierro Duret and Jean-Francois Moreau, "Reduction of Pollutant Emissions of the IAPAC Two-Stroke Engine with Compressed Air Assisted Fuel Injection", SAE Paper-900801, 1990.
7. G. E. Hundleby, "Development of a Poppet-Valved Two-Stroke Engine-The Flagship Concept", SAE Paper-900802, 1990.
8. J. Stokes, G. E. Hundleby, T. H. Lake, and M. J. Christle, "Development Experience of A Poppet-Valved Two-Stroke Flagship Engine", SAE Paper-920778, 1992.
9. Kang Y. Huh and et al., "Scavenging Flow Simulations of A Four-Poppet-Valved Two-Stroke Engine", SAE Paper-930500, 1993.
10. David Thornhill and Robert Fleck, "Design of A Blower-Scavenged, Piston-Ported, V6, Two-Stroke Automotive Engine", SAE Paper-930980, 1993.
11. Bruce J. Tobis, Robert Meyer, Jialin Yang, and et al., "Scavenging of a Firing Two-Stroke Spark-Ignition Engine", SAE Paper-940393, 1994.
12. John B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-hill, 1988.
13. Edward F. Obert, Internal Combustion Engines and Air Pollution, Intext Edu. Publishers, 1973.
14. Charles Fayette Taylor, The Internal Combustion Engine in Theory and Practice, MIT press, 1966.
15. 長尾不二夫 외, 내연기관, 대광서림, 1977.
16. 김희철, 유병철, 내연기관, 문운당, 1970.
17. Gordon P. Blair, The Basic Design of Two-Stroke Engines, SAE, 1990.
18. K. K. Kuo, Principle of Combustion, Wiley, 1986.
19. Motor Fan, 1992, 12.
20. AVL Focus, 1993, 5.
21. Ward's Engine and Vehicle Techology Update, 1992-1993.
22. Automotive Engineering, 1992, 8.
23. 정용일, "자동차용 2-행정 디젤엔진 기술의 현상과 미래", 자동차공학회 강연초록, 1993, 10.
24. Floyd A. Wyczalek, "Two-Stroke Engine Technology in 1990's", SAE910663.
25. 자동차기술, Vol. 47, No. 1, 1993, p46.