

# 회박연소방식

## Lean Burn Engine

정 경 석\*  
Kyung Seok Jeong

### 1. 서 론

회박연소방식을 이용함으로써 SI 엔진의 열효율을 높일 수 있다는 것은 1900년대 초에 이미 알려진 바 있다. 가솔린 기관의 이론 사이클인 공기표준 Otto 사이클의 이론 열효율은 다음과 같이 압축비( $\epsilon$ )와 작동유체의 비열비( $\kappa$ )만으로 표현되므로 압축비나 비열비가 커질수록 열효율은 증가하게 된다.

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}}$$

그림 1은 온도변화에 대한 공기 및 각종 탄화수소 연료의 비열비를 나타낸 것이다. 가솔린은 혼합물이기 때문에 순수물질과 같이 고유한 비열비값을 갖는 것은 아니지만 대개 iso-octane의 비열비와 크게 다르지 않다. 공기의 비열비는 약 1.4로 거의 일정한 값을 가지며, iso-octane은 1.03~1.05이므로, 연료-공기 혼합기중 연료가 차지하는 비율이 감소할수록 비열비는 공기의 값에 가깝게 증가한다. 그림 2는 압축비가 동일한 조건에서 공연비가 변화할 때의 열효율로, 혼합기가 회박해짐에 따라 열효율이 증가하는 것을 보인다.

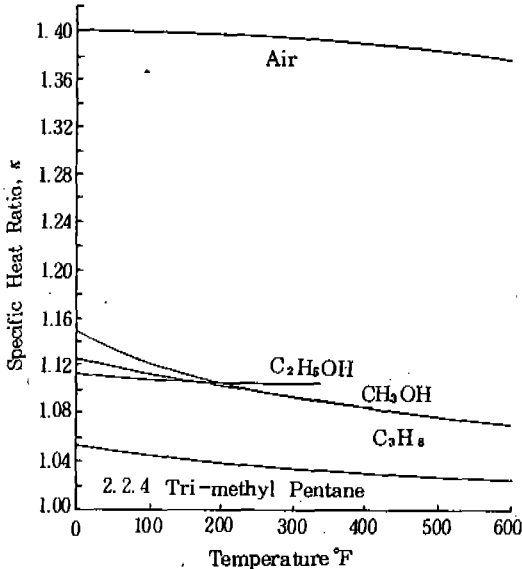


그림 1. 각 물질의 비열비

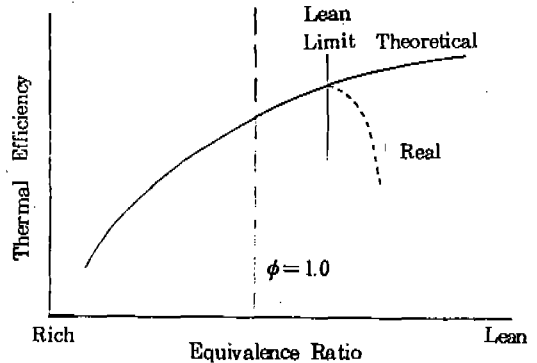


그림 2. 혼합비 변화에 따른 열효율의 변화

\* 정희원, 대우자동차(주) 기술연구소, 신엔진 개발 담당

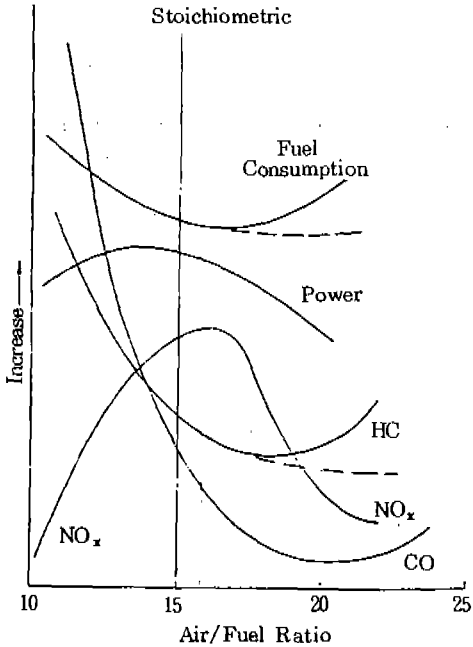


그림 3. 공연비 변화에 따른 연료소비율, 출력, 유해배출물

그림 3은 공연비에 대한 출력, 연료소비율, 유해배출물 생성의 변화를 나타낸 것으로 적절한 희박혼합비로 운전하게 되면 연료 경제성을 향상함과 동시에 유해물질의 배출억제가 가능함을 알 수 있다. 희박연소방식은 이와 같은 장점을 가짐에도 불구하고, 실화나 불완전 연소 등으로 인해 운전성능이 악화된다거나 미연 탄화수소의 배출이 증가한다는 등의 문제가 있기 때문에 실용화를 위한 적극적인 노력이 기울여지지 않아 왔다.

그러나 1970년대 석유과동 이후 보다 높은 효율의 엔진에 대한 요구가 증대되었고, 유해물질(특히  $\text{NO}_x$ )의 배출에 대한 규제가 엄격해짐에 따라 기존의 엔진으로는 만족시킬 수 없는 상충되는 두 요구에 대응할 수 있는 방법으로 희박연소방식의 활용이 검토되기 시작했다. 여기서는 희박연소방식이 가지는 문제점과 그 극복을 위한 노력 및 그간 발표된 몇 종류의 실용엔진을 소개한다.

## 2. 희박연소방식에 있어서의 문제

희박연소방식은 점화성능이 나쁘고 화염전파속도가 느리기 때문에 불완전 연소와 time loss가 발생하는 등의 문제가 있는데, 이로 인한 cyclic variation이 커짐으로써 driveability의 악화를 초래한다. 또 불균일 혼합기로 인한 HC 배출이 증가하는 것도 또다른 문제점이 되고있다. 여기서는 희박연소방식이 가지는 근본문제인 점화 및 화염전파의 문제를 검토하고, 이의 극복을 위한 노력들을 소개한다.

### 2.1 점 화

SI엔진에서의 연소는 스파크에 의한 화학반응으로부터 시작되는데, 혼합기가 지나치게 과농하거나 혹은 과박한 경우에는 점화에 요구되는 에너지의 양이 매우 커진다. 그림 4는 혼합비에 따른 최소 점화에너지를 보인 것으로, stoichiometric으로부터 과농 및 과박 영역으로 감에 따라 그값은 점차 증가하는 양상을 나타낸다. 또 혼합기가 유동속도를 가지면 더많은 점화에너지가 요구됨을 알 수 있다. 희박혼합기의 점화에 요구되는 높은 에너지를 공급하기 위해서는 기존의 방식에 비하여 스파크 지속시간이 길게되도록 하거나, 간극이 큰 스파

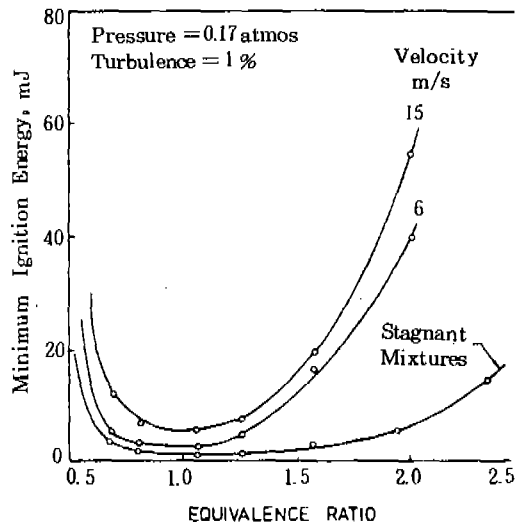


그림 4. 공연비 변화에 따른 점화에너지와 유동의 영향

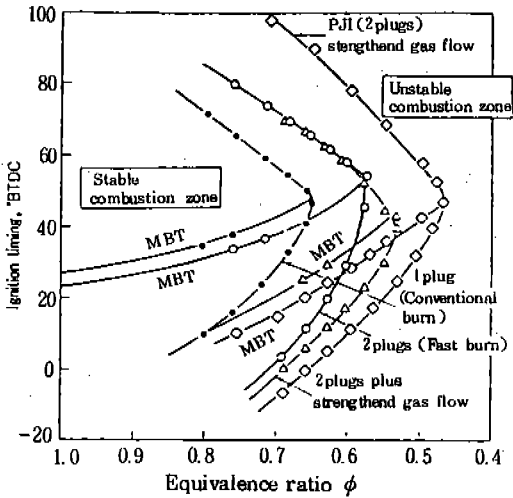


그림 5. 플라즈마 점화에 의한 안정연소영역의 확장

크 플러그를 이용하여 혼합기에 많은 에너지가 주어지도록 하면서 소염의 영향은 작아지도록 하는 등의 방법이 있다. 또는 각각의 discharge system을 가지는 2개 이상의 스파크 플러그를 이용하여 동시 다발점화가 이루어지도록 하는 방법도 있다. 그리고 평균적으로는 희박혼합기이지만 혼합기 공급시, 스파크 플러그에 가까운 영역에는 stoichiometric 또는 과농혼합기가 먼 영역에는 과박혼합기가 공급되도록 하여 안정적인 점화가 행해지도록 하기도 한다. 이외에 작은 규모의 부연소실을 설치하는 것과 같은 방식의 연소제트 발생장치나 플라즈마 점화장치를 이용한 점화방식에 대하여도 많은 연구가 이루어지고 있다. 그림 5는 플라즈마 제트를 이용하여 점화성능을 실험한 결과로 안정점화영역의 대폭 확장이 가능함을 알 수 있다. 이외에도 점화장치는 기존의 것을 그대로 이용하면서 Di-t-Methyl Peroxide와 같은 물질을 연료에 첨가함으로써 점화성능을 향상시키는 방식 또한 연구되고 있다.

2.2 화염전파

혼합기의 연소율은 화염의 전파속도와 화염면에 의해 결정되는데 이에 영향을 미치는 주요 인자는 그림 6에 보인 것과 같이 점화 플러

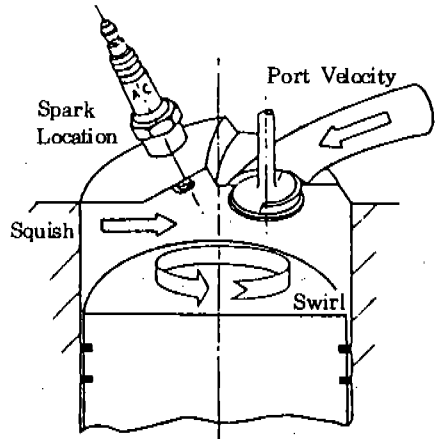


그림 6. 엔진 디자인 요소의 개념도

표 1. 각 디자인 요소변화에 따른 연소인자의 감소율(%)

Factor	Ignition Delay	Combustion Duration	Cyclic Variation
Spark Plug Location	4.8	20	30.5
Port Charge Velocity	12.8	24	27.0
Swirl	33.2	24	50.5
Squish	6.4	11	16.8
Combination of all four factors	20	42	59

그의 위치, 혼합기 흡입속도, swirl 및 squish 유동 등이다. 이들 인자의 영향을 조사한 실험의 결과를 표 1에 보인다. 이 실험의 조건은 1500 rpm, 도시마력 482 kPa, 공연비 14.2, MBT spark timing이다. 이 실험결과는 각 인자에 변화를 줌으로써 점화 지연, 연소시간 및 cyclic variation을 감소시키는 것이 가능함을 보여준다. 그런데 이들 인자들 사이에는 상호작용이 있기 때문에 그 영향이 산술적인 합으로 나타나지는 않는다. 흡입 혼합기의 유동에 swirl을 발생시키는 방법으로는 흡기관에 Vortex generator 또는 Helical port를 설치하거나, shroud 흡기밸브의 사용 등이 있다. 또 연소실의 기하학적 형상을 we-

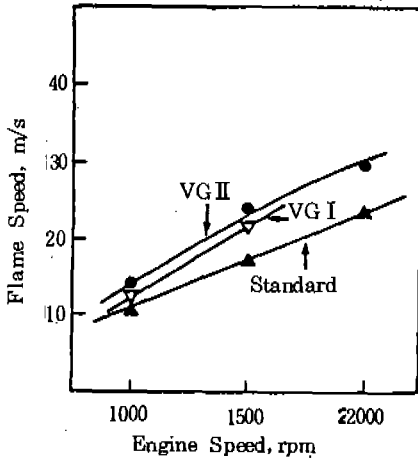


그림 7. Vortex generator가 설치된 엔진과 기본엔진의 화염전파속도

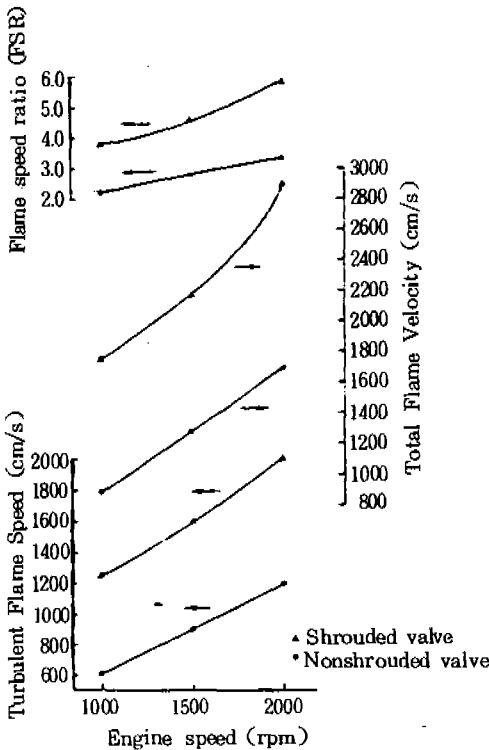


그림 8. Shroud 밸브를 설치했을 때의 변화

dge 또는 bowl 형으로 변화하여 swirl이나 squish 유동의 발생을 유도하거나, 부연소실을 설치하여 부연소실로부터 분출되는 미연 및 기연가스의 분출에 의해 주연소실내 유동을 교

란시키는 방법 등이 있다. 그림 7 및 그림 8은 각각 Vortex generator와 shroud 밸브를 이용하여 흡기에 교란을 주었을 때 화염전파속도의 변화를 나타낸 것으로 흡기에 교란을 줌으로써 화염전파속도를 증가시키고 이로써 엔진의 안정된 운전상태를 얻을 수 있음을 보여준다.

### 3. 희박연소방식의 실용화

유해물질 배출억제의 관점에서만 본다면 현재 사용되고 있는 산소감지기가 있는 3원 촉매 환원방식이 가장 훌륭한 방법이다. 그러나 이방식은 공연비를 반드시 stoichiometric으로 하여야 하기 때문에 연료경제성의 관점에서는 바람직하지 못하다. 희박연소방식을 도입하면 연료 소비율은 줄이면서 NO<sub>x</sub>의 생성을 억제하는 것이 가능하다. 공연비가 약 19가 되면 심한 torque fluctuation이 발생하여 운전성능을 악화시키지만, 앞서 검토한 여러 방법을 이용한 연소의 개선을 통해 공연비가 약 22인 때도 안정된 torque를 얻을 수 있다. 이렇게 하였을 때의 희박연소방식과 3원 촉매방식을 비교한 것이 그림 9인데, 희박연소방식을 이용함으로써 연료소비율을 10~15% 감소시킬 수 있다. 1970년대 이후 희박연소방식의 실용화를 위해 많은 노력이 기울어졌지만, 최근에는 비로서 차량에 탑재가 가능하게 되었다. 일본의 도요다 자동차는 10여년의

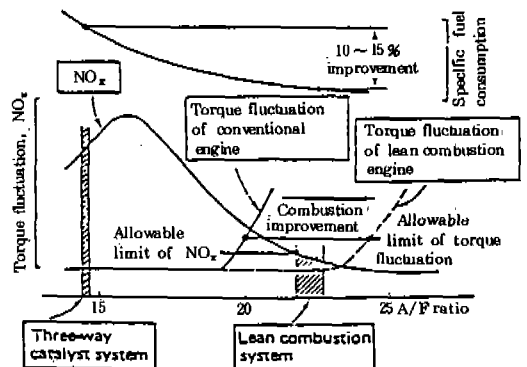


그림 9. 3원촉매장치시스템과 희박연소방식의 비교

표 2. 각 자동차사의 희박연소방식엔진

Maker	Displacement Volume( $\ell$ tr)	Compression Ratio	Bore $\times$ Stroke (mm)	Max. Power (kw/rpm)	Max. Torque (Nm/rpm)	Remark
Volkswagen	0.9	8.0	69.5 $\times$ 59	29/5900	61/3500	Prechamber
	1.1	8.0	69.5 $\times$ 72	37/5800	76/3500	
	1.3	8.3	75.0 $\times$ 72	44/5800	95/3500	
Ford	2.4	9.5	84.0 $\times$ 62	96/5800	193/3000	V-6
	2.9	9.5	93.0 $\times$ 69	110/5700	233/3000	
Toyota	1.6	9.5	81.0 $\times$ 77	75/5800	142/3000	4 Valve MPI

개발기간을 거쳐 희박연소방식의 엔진을 탑재한 차종인 Carina 모델을 발표하였다. 이것은 최초의 희박연소방식의 차종으로 55kw 출력의 1.6 $\ell$ -4실린더의 엔진을 4밸브 two overhead camshaft 엔진으로 개조하여 75kw의 출력을 얻었다. 표 2는 각 자동차 회사에서 발표한 희박연소방식 엔진의 특성을 나타낸 것이다.

이들 엔진은 모두 기존의 것을 희박연소가 가능하도록 개조한 것으로, 개조 이전과 비교하면 출력되는 Power 와 Torque 는 비슷한 수준을 유지하지만 연료소비율은 약간 감소함을 보인다.

#### 4. 맺음 말

이상과 같이 희박연소방식에 따르는 이점과 문제점을 살피고 이미 실용화된 예를 소개하였다. 희박연소방식의 엔진은 극한적인 조건 하에서 운전되는 것이기 때문에 실용화를 위해 해결하여야 할 여러가지의 기술적인 문제를 가지고 있다. 따라서 희박연소방식에 관한 연구를 통해 그 자체의 실용화 뿐만 아니라 기존 개념의 엔진 개발에 요구되는 기술을 부수적으로 얻을 수 있기도 하다.

#### 참 고 문 헌

- G.J. Germane, C.G. Wood and C.C. Hess, "Lean Combustion in Spark-Ignited Internal Combustion Engine - A Review," SAE Paper 831217, 1983.
- S.J. Harris and B.D. Peters, "Effect of Di-t-Butyl Peroxide on the Lean Operating Limit of a Spark-Ignition Engine," Combustion Science and Technology, vol.29, pp.293- 298, 1982.
- W. Bradstetter, "The Volkswagen Lean Burn PC-Engine Concept," SAE Paper 800456, 1980.
- 浜井九五, "自動車用ガソリンエンジンの基礎と實際(9)," 日本内燃機関, Vol. 26. No. 335. pp.105~112. 1987.
- D.R. Ballal and A.H. Lefebure, "The Influence of Flow Parameters on Minimum Ignition Energy and Quenching Distance," The 15th Symposium (International) on Combustion, pp.1473-1481, 1974.
- W. Schnabel, "Toyota Stellt Ersten Serienmäßigen Magermotor vor," Motortechnische Zeitschrift, 50 Jahrgang, Nr. 1, pp.29-30, 1989.