

〈논 문〉 SAE NO. 96370115

전부하시 희박영역에서의 천연가스엔진 성능향상에 관한 연구

A Study on the Performance Improvement for a Natural Gas Engine under Lean Burn & WOT Condition

김 창 업*, 김 창 기*, 김 승 수**, 방 효 선***, 한 정 옥****, 조 양 수***
C. U. Kim, C. G. Kim, S. S. Kim, H. S. Pang, J. O. Han, Y. S. Cho

ABSTRACT

Many researches on natural gas engines, with lean mixtures are being conducted for the purpose of preservation of global environment. Lean combustion is one of the most promising method for increasing engine efficiency and reducing the emission from SI engines. Due to the possibility of partial burn and misfire, however, under lean burn operation, stable flame kernel formation and fast burn rate, by use of swirl or tumble flow, are needed to guarantee a successful subsequent combustion. Experimental data were obtained on a 4-stroke, natural gas fueled SI engine to investigate the effect of compression ratio, swirl and spark plug electrode rotation on efficiency and emission under lean burn condition. Experimental results have displayed that higher compression ratio, presence of swirl vane and favorable direction of electrode gap brought about the improvements in engine efficiency and its operational stability.

주요기술용어 : Natural gas(천연가스), Lean burn(희박연소), Swirl(선회), Swirl vane(선회날개)

1. 서 론

엔진의 배기가스규제에 대한 대책으로 저공해성 청정연료인 천연가스의 사용이 늘고있다^{1), 2)3)}

이 연료는 높은 옥탄가에 의한 고압축비의 채택이 가능하여 고효율화도 이룰 수 있으며⁴⁾, 문제시되는 NOx의 경우는 희박연소기법⁵⁾등을 이용하여 그 배출량을 줄일 수 있다. 특히 희박연소는 연소의 안정화를 위해서 효과적인 난류의 생성이 필요하며 이를 위해 선회나 텀블동의 흡입유동이 이용된다.⁶⁾ 또 이러한 흡입유동이 있을 경우, 점화플러그의 방향은 엔진의 성능에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.⁷⁾

* 한국과학기술원 기계공학과
** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과
*** 한국가스공사 연구개발원
**** 정회원, 한국가스공사 연구개발원

본 연구에서는 희박연소기법을 고압축비의 천연가스엔진에 적용하여 고효율 및 저공해를 동시에 이루고자 하였다. 희박영역에서의 연소의 안정화를 위해 선회유동 발생장치(선회날개)를 제작, 설치하였고 이에 의해 발생된 선회유동에 점화플러그의 방향을 최적화하여 엔진성능을 향상시키고자 하였다.

2. 실험장치

2.1 실험엔진

실험엔진은 1800cc급 LPG엔진이며, 이는 공기와 연료가 믹서(Mixer)에서 혼합되는 예혼합 방식(premixed)이다. 연료주밸브(MAS, Main Adjust Screw)을 조절하여 혼합기의 공기과잉율을 변화시켰으며 디스튜리뷰터를 조정하여 점화시기를 바꾸었다. 실험엔진의 재원이 Table 1에 나타나 있다.

Table 1 Engine Specification

| | |
|--------|-----------|
| 형식 | OHC 직렬4기통 |
| 보어-행정 | 80.6~88mm |
| 배기량 | 1796cc |
| 압축비 | 9.2 : 1 |
| 연료공급장치 | 기화기·믹서 |
| 연료 | 천연가스 |

2.2 데이터 획득장치

(Data Acquisition System)

본 연구에서는 자체개발된 연소분석기를 이용하여 기관의 회전수 및 실린더 내의 연소압력데이터를 취하였다. 엔진내 압력을 측정하기 위해 KISTLER 6051A의 S/P형 압력센서와 5007형 전하증폭기를 사용하였고, 엔진의 각부위에 K형 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다. 엔진의 발생동력을 측정하기 위한 동력계는 Dynamatic사의 250HP급의 와전류식이며 공기 및 연료유량계는 오리피스형의 유량계로서, 각각 총류유량계와 버블유량계로 점정하여 사용하였다. 배기가

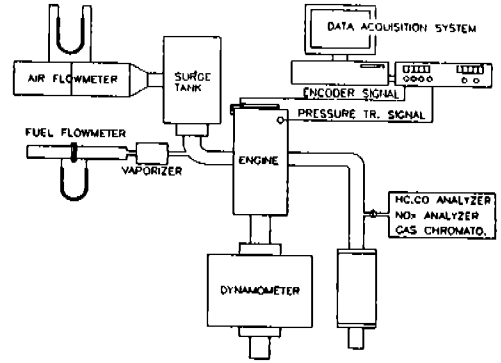


Fig.1 Schematic diagram of test apparatus

스의 분석은 NOx, HC, CO분석기 그리고 가스 크로마토그래프(G.C)를 이용하였다. 전체적인 실험장치도가 Fig.1에 나타나 있다.

3. 실험방법 및 조건

모든 실험은 전부하조건(WOT)에서 엔진회전수를 1800rpm에 고정시킨후 공기과잉율을 바꾸어 가며 엔진의 출력특성을 하였으며 효율 및 배기가스분석을 통하여 성능을 파악하였다. 엔진효율(η_i)과 공기과잉율(λ)의 정의는 다음과 같다.

$$\eta_i = \frac{P(\text{출력})}{m(\text{연료유량})Q_{HV}(\text{발열량})}$$

$$\lambda = \frac{(A/F)_{\text{actual}}}{(A/F)_{\text{stoichiometric}}}$$

점화시기는 MBT(Maximum Brake Torque) 점화시기이며 엔진의 냉각수 출구온도를 $80 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 유지하여 데이터의 일관성을 유지코자 노력하였다. 압력데이터는 각 실험조건에서 300싸이클을 받아 이를 앙상블을 평균하여 사용하였다.

3.1 압축비

천연가스연료는 옥탄가가 LPG보다 상당히 높다는 것은 잘 알려진 사실이고 실험엔진은 원래

LPG엔진임으로 이의 압축비를 엔진의 큰 변형 없이 가급적 13이상으로 높이고자 하였다. 압축비는 엔진의 최대체적/최소체적임으로 이를 높이는 방법에는 여러 가지가 있겠지만, 연소실의 형상의 변화를 최소로 유지하며 작업의 간편을 기하기 위해서 본 연구에서는 엔진헤드의 밀면을 절삭하여 최소체적을 축소하였다. 엔진 원상태의 압축비는 9.2이며 최대압축비를 임의로 13.2로 정하여 실험하였고 중간값으로 11.6을 역시 임의로 설정하여 압축비의 효과를 측정하여 보았다. 그러나 최대압축비를 13.2로 하였을 때 노킹 등 엔진작동에 하등의 문제가 없었으나, 이 경우 너무 과다하게 엔진헤드의 밀면을 절삭함으로써 엔진구조상 문제가 발생할 소지가 있었으므로 최종적으로 이를 11.6으로 변경하는 것으로 그쳤다.

3.2 선회날개(Swirl vane)

희박영역에서의 연소의 가속화를 위해서는 선회나 텀블등의 난류강도를 더 한층 강화시키는 유동이 필요하다. 본 연구에서는 선회유동을 발생시키는 선회날개를 제작하여 다음에 설명하는 바와 같이 설치하였다. 선회날개는 그 설치로 인하여 선회비의 증가를 가져오지만 유동의 흐름을 방해함으로써 흡입유량의 감소를 가져오게 된다. 이에 따라 paddle wheel를 이용한 정상유동실험(steady flow test)에서 (Fig.2) 최적 선회날개를 선택하였다. 선회비는 횡방향속도/축방향속도로 다음과 같이 정의하였다.

$$S.R = \frac{V_{\theta}}{V_r} = \frac{\pi d N}{Q_d / A}$$

- where d : paddle wheel 유효직경
- N : paddle wheel 회전수 (rpm)
- Q_d : 축방향 체적유량
- A : 축방향 실린더 단면적

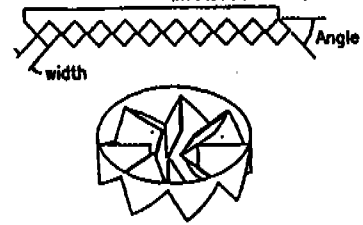


Fig.3 Rough shape of swirl vanes

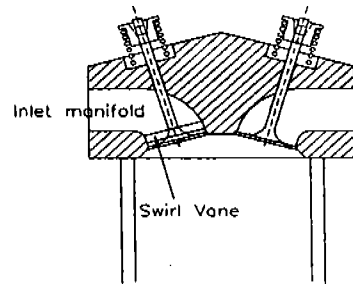


Fig.4 Installation position of swirl vane

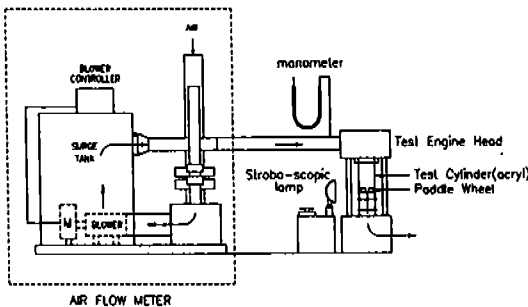


Fig.2 Schematic diagram of swirl vane steady flow test

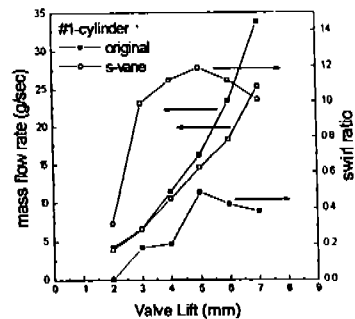


Fig.5 Mass flow rate and swirl ratio comparison of w/, w/o swirl vanes

선회날개를 날개폭(0.7, 1.0, 1.3cm), 날개각도(35°, 45°, 55°), 날개수(6, 8, 10개)를 변수로 제작하여(Fig.3) 정상유동실험을 한 결과, 날개폭 1.0cm, 날개각도 45°, 날개수 10개가 최적의 선회날개로 선정되었으며, 이를 실험엔진의 흡입밸브시트의 바로 윗부분에 한 개씩, 전체 4개를 설치하였다.(Fig.4) 선회날개의 설치전후의 흡입유량과 선회비변화가 Fig.5에 나타나 있다.

3.3 점화플러그

선회유동이 있을 때 점화플러그의 방향은 엔진의 성능에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이를 알아보기 위해 플러그의 방향을 유동방향에 대해 4가지로 바꾸어 가며 실험을 하였다.(Fig.6) 플러그의 방향변화를 위해 0.2mm 동판을 사용하였으며 최대 동판 2개를 사용하여 플러그의 연소실 안쪽 돌출부의 영향을 최소화하였다. 선회유동에 대하여 점화플러그의 접지전극의 위치가 상류(upstream)측에 위치한 경우를 sf-1, 하류(downstream)에 위치한 경우가 sf-2, 측면으로 위치했을 경우에 접지전극이 연소실 중앙부측에 있을 경우를 sf-3, 바깥쪽에 있을 경우를 sf-4로 정의하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 압축비영향

Fig.7은 압축비의 증가로 인한 효율의 증가가 나타남을 보여주고 있다. 압축비 9.2의 경우 최

대효율이 공기과잉을 1.1부근에서 나타나고 있으며 압축비가 증가할수록 잔류가스의 감소로 최대효율이 나타나는 공기과잉율이 희박영역으로 이동하였다. NO_x의 경우 압축비의 증가로 인해 약간 증가하는 경향이 보였으나 공기과잉율 1.4 이하에서는 매우 적은 양이 생성됨을 보여주고 있다. 미연탄화수소(UHC)는 거의 비슷한 수치

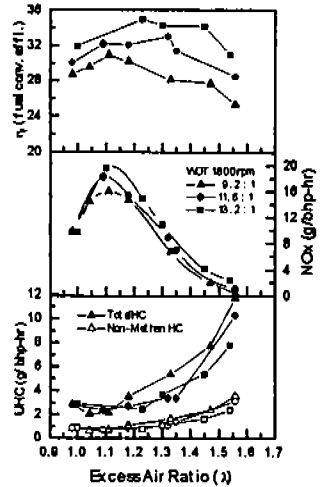


Fig.7 Effects of compression ratio on engine performance

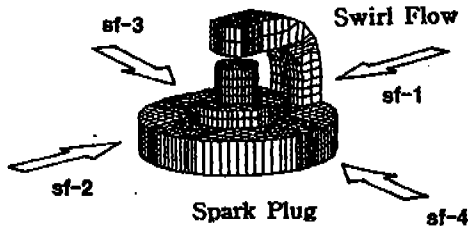


Fig.6 Relative direction of spark plug electrode to in-cylinder bulk gas flow

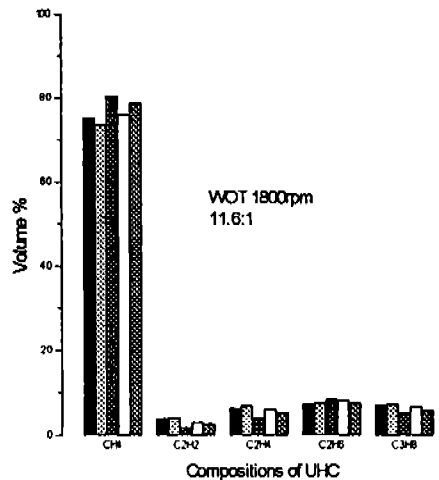


Fig.8 Compositions of UHC at 5 different samplings

를 나타내었다. NMHC의 성분을 알아보기 위해 배기가스를 G.C로 분석한 결과, 70~80%가 메탄으로 나타났으며 나머지는 미량의 에탄(C₂H₆), 에틸렌(C₂H₄), 아세틸렌(C₂H₂)과 프로판(C₃H₈) 등으로 구성되었다. Fig.8이 압축비 11.6의 한 예를 보여주고 있다. 전반적으로 압축비 제고의 효과는 연료-공기 싸이클(fuel-air cycle)에서 예견되는 수준의 상대적인 향상이 구현됨을 보여주었다.

4.2 선회영향

Fig.9의 효율선도에서 보듯이 선회날개를 설치함에 따라 압축비 9.2의 경우, 공기과잉율 1.25이하에서는 비슷한 효율을 보였으나 1.25이상 영역에서는 더 높은 수치를 나타내었다. 이러한 선회날개의 효과는 압축비가 높아짐에 따라 감소되었는데 이는 압축비가 증가함에 따라 연소실 형상의 최적화로부터 벗어나게 되고, 또 표면적 대 체적비의 증가로 열손실이 커지기 때문으로 생각된다. NO_x와 UHC의 배출에서는 선회날개의 설치전후 주목할 만한 차이점을 발견치 못하였다. 이상의 결과에서 회박영역에서의 안정화와 배기가스 발생량을 고려하여 압축비 13.2을 취함이 바람직하였으나 상기한 바와 같이 기존상용 엔진의 변형가공에 따른 엔진의 내구성문제를 감

안하여 압축비를 11.6으로 채택한 후 최선의 선회날개를 결정하여 차후의 모든 실험을 행하였다.

4.3 점화플러그의 영향

Fig.10은 위의 실험에서 압축비 11.6, 최적의 선회날개가 부착된 1800rpm, WOT 엔진조건에서 점화플러그의 방향변화에 대한 엔진성능 실험 결과를 보여주고 있다. Fig.6이 보여주고 있는 4개의 방향중에서 sf-1이 대체적으로 가장 높은 효율을 나타냈으며 sf-3과 sf-4는 거의 비슷한 경향을 sf-2가 가장 낮은 효율을 보였다. sf-1은 선회류에 의하여 화염핵이 접지전극으로부터 멀어져 감으로 이의 열손실이 가장 적게 됨으로써 가장 왕성한 화염핵의 형성이 가능해 진다는 이론을 실험적으로 증명해 주는 결과이다. 선회류와 직각방향의 경우인 sf-3과 4는 비슷하고 역방향인 sf-2의 경우는 가장 열등한 열효율 및 UHC 배기성능을 보여주고 있다. 이 같은 방향 최적화의 효과는 압력데이터 분석에서도 나타나고 있는데 전체적인 싸이클간의 변동이 적어지는 안정된 상태를 보이고 있다.

최종적으로 압축비 9.2의 기준엔진의 경우와 압축비 11.6, 최적의 선회날개부착 및 점화플러그의 방향으로 지금까지 얻은 각각의 최적조건을

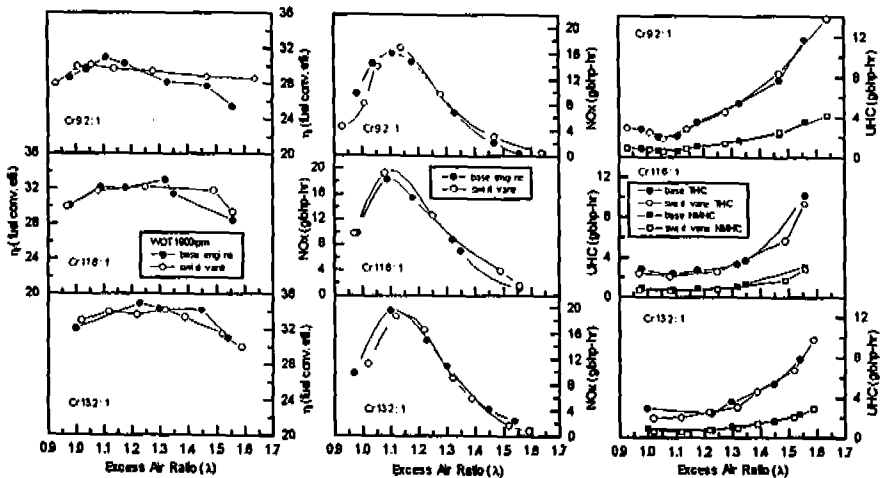


Fig.9 Effect of swirl vane on engine performances under different compression ratios

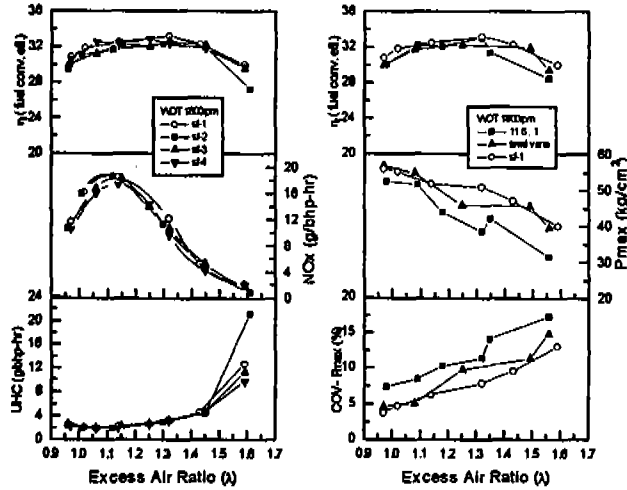


Fig.10 Effect of spark plug electrode direction on engine performance

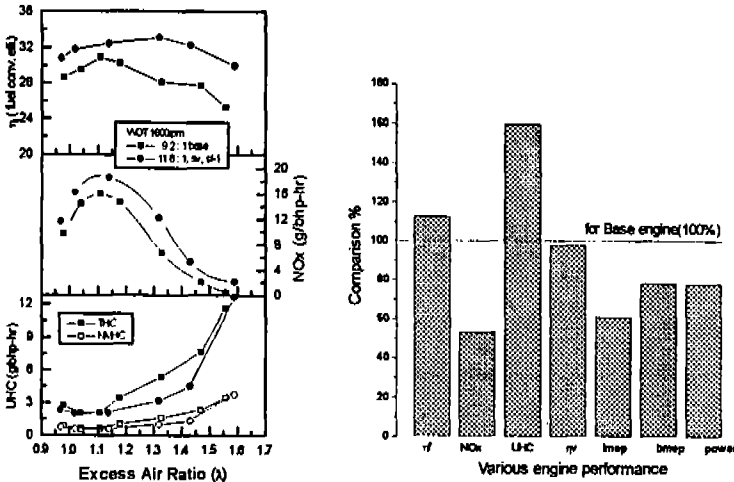


Fig.11 Performance comparison diagrams of base engine and finally modified engine

모두 취합했을 경우를 비교한 결과를 Fig.11이 보여주고 있다. 이 엔진을 공기과잉율 1.4부근으로 운전했을 경우 기존엔진의 공기과잉율 1.0에서의 운전과 비교할 때, 효율은 약 12.7% 증가하고 NOx는 46.7% 감소한다. UHC은 약 60%가 증가하지만 NMHC는 Fig.8이 보여주고 있는 바와 같이 UHC중 1/4정도밖에 되지않아 실질적인 의미는 별로 없다고 생각된다.

5. 결 론

- 이상의 실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.
- 1) 압축비를 높임으로써 효율의 증가를 볼 수 있었으며 이의 상대적 증가치는 연료-공기 사이클에서 얻어지는 수치와 비슷하였다.
 - 2) 압축비의 증가로 NOx가 증가하였으나 이

를 회박연소함으로써 대폭 줄일 수 있었다.

- 3) 선회날개의 부착으로 인해 회박영역에서의 연소의 안정화를 기할 수 있어 효율이 증가하였으며 선회에 적합한 점화플러그의 방향을 최적화 시켜줌으로써 이를 더욱 향상시킬 수 있었다.
- 4) 최종 변형된 엔진을 공기과잉율 1.4에서 운전하고 이를 기존의 엔진을 공기과잉율 1.0에서 운전하였을 경우와 비교하면 약간의 NMHC 배출증가를 감수함으로써 효율은 12.7% 증가, NOx는 46.7% 감소하는 바람직한 효과를 거둘 수 있었다.

6. 참고문헌

1. C. S. Weaver, "Natural Gas Vehicle-A Review of the State of the Art", SAE 892133, 1989
2. I. Fukutani, "天然ガス エンジンの 性能", 内燃機關 32卷 1號, 1993.
3. Y. Ko, K. Kurihara, T. Sakai, R. Osuga, B-C. Choi, T. Ayusawa, E. Kim, "Research and Development of LNG vehicle for Practice Use" SAE 920594, 1992
4. R. D. Fleming, G. B. O'Neal, "Potential for Improving the Efficiency of SI Engine for Natural Gas Fuel", SAE 852073, 1985.
5. G. T. Germane, C. G. Wood, C. C. Hess, "Lean Combustion in S. I. Internal Combustion Engines-A Review" SAE 831217, 1983
6. H. Endres, H-T Neuber, R. Wurms, "Influence of Swirl and Tumble on Economy and Emissions of Multi Valve S. I. Engines" SAE 920516, 1992
7. T. Mantel, "Three Dimensional Study of Flame Kernel Formation Around a Spark Plug", SAE 920586, 1992.