

SCV를 장착한 CNG 엔진의 연소 및 배출가스 특성

김진영^{*1)} · 박원옥¹⁾ · 공태원¹⁾ · 하종률²⁾

동아대학교 기계공학과 대학원¹⁾ · 동아대학교 기계산업시스템공학부²⁾

Combustion and Emission Characteristics in CNG Engine with SCV

Jinyoung Kim^{*1)} · Wonok Park¹⁾ · Teawon Kong¹⁾ · Jongyul Ha²⁾

¹⁾Graduate School, Dong-a University, Busan 604-714, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Dong-a University, Busan 604-714, Korea

(Received 29 June 2002 / Accepted 13 March 2003)

Abstract : Natural gas is one of the promising alternative fuels because of the abundant deposits and the cleanness of emission gas. CNG has a lot of merits except lower burning speed has a slow disadvantage. One way to overcome the disadvantage is to raise a turbulence intensity. We give various intake for changing turbulence intensity in the cylinder by three kinds of swirl control valve with a way to raise a turbulence intensity. In the present study, a 1.8 ℓ conventional gasoline engine is modified to use a CNG as a fuel instead of gasoline. We try to verify combustion and emission characteristics in each engine parameters. Parameters of experimentation are equivalence ratio, spark timing and intake flow change. The results of this study are as follows. In the case of adding swirl flow, burning speed and torque are increased. But NO_x and THC concentration are increased a little respectively.

Key word : Compressed natural gas(압축천연가스), Swirl control valve (스월조절밸브), Flow(유동), Emission(배출가스), Alternative fuel (대체연료), Turbulence intensity(난류강도)

1. 서론

천연가스는 배출가스의 청정성과 에너지 공급 안정성 등으로 가장 유망한 대체연료중의 하나로 주목을 받고 있다. 현재 사용되고 있는 가솔린 기관에 천연가스를 연료로 대체하여 사용할 때, 기관구조를 크게 변경시키지 않고도 사용이 가능하다. 또 천연가스는 옥탄가가 130정도로 높기 때문에 압축비를 높일 수 있고, 가스상태이므로 액상의 연료에 비해 혼합기 형성이 용이하여 시동성이 양호하고 균질혼합기를 형성할 수 있다. 또한 연소 한계 범위가 넓어 희박연소의 실현이 용이하고 유해 배출가스를 줄일 수 있는 이점이 있다.¹⁾

반면 가스상태로 기관에 흡입되므로, 가솔린과 비교할 때 체적효율의 저하, 느린 연소속도에 의한 실화 및 부분연소가 발생하는 단점을 가지고 있다.

연소속도는 혼합기의 난류강도에 따라 큰 영향을 받기 때문에 급속연소를 위하여 난류강도를 높여 화염전파속도를 증가시킴으로써 연소기간을 단축시키는 방법을 사용하고 있다.^{2,3,7)}

Tabaczynski는 SI기관의 연소실 내 유동이 연소특성에 미치는 영향을 고찰한 결과 난류강도는 화염전파율을 지배하고 난류강도의 크기는 착화의 성공여부에 중요한 영향을 미친다는 사실을 확인한 바 있다.⁴⁾ 또, DOHC 기관의 주 유동인 텀블 유동은 압축과정 상사점 부근에서 붕괴되어 발화에 직접적인 영향을 주는 작은 스케일의 강한 난류가 발생되고,

*To whom correspondence should be addressed.
su:rof21@hanmail.net

이로 인해 보다 안정적인 혼합기의 연소가 실현될 수 있음을 밝힌 바 있다.⁵⁾

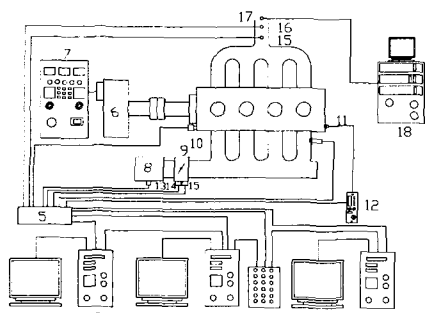
난류강도를 강화하기 위하여 기관에 SCV (swirl control valve)의 설치, 흡기계 구조변경, 흡기포트의 설치 각도 등을 변화시켜 스윙(swirl)이나 텀블(tumble) 또는 경사텀블(inclined tumble) 등의 유동을 생성시켜 실린더 내의 유동장을 강화한다.

본 연구에서는 천연가스의 단점중의 하나인 연소 속도 느린 것을 개선하기 위하여 스윙조절밸브를 장착하여 난류강도를 높이는 방법을 사용하였다. 실린더내 유동특성이 확실하게 구분되는 3종의 스윙조절밸브를 선정하였다. 이를 통해 유동 변화에 따른 연소특성을 밝힌다. 아울러 당량비, 점화시기를 변경하면서 엔진의 성능과 연소안정성 및 배기가스 특성을 분석하여, 연소속도의 개선점을 밝히는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 CNG 전소엔진

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 구성도를 나타낸 것이다. 실험장치는 1.8 l, DOHC 4기통 상용엔진을 기존의 가솔린엔진 연료공급장치를 제거하고 CNG 연료시스템을 설치한 MPI용 CNG 전소엔진으로 개조하였다. 기관의 주요제원은 Table 1과 같다. 그 외 엔진부하제어를 위한 동력계, 기관 주변



- | | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 1. Main PC | 10. Encoder |
| 2. Signal process unit | 11. Pressure sensor |
| 3. Air mass calculating PC | 12. Pressure sensor amplifier |
| 4. Ignition timing control PC | 13. Mass air flow sensor |
| 5. Interface & A/D board | 14. Throttle position sensor |
| 6. Dynamometer | 15. UEGO sensor |
| 7. Dynamometer controller | 16. O ₂ sensor |
| 8. Air cleaner | 17. Exhaust gas sampling |
| 9. Throttle body | 18. Exhaust gas analyzer |

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specifications of test engine items

Items	Specification
Type of engine	4-valve four-cylinder SI engine (DOHC)
Type of combustion chamber	Pent roof
Intake valve Open Close	6 deg. BTDC 46 deg. ABDC
Exhaust valve Open Close	50 deg. BTDC 10 deg. ABDC
Bore × Stroke	81.0 × 87.0
Compression ratio	9.5 : 1

장치를 제어하는 제어부, 배기가스 분석장치와 연소해석장치로 구성되어 있다.

실험엔진의 제어를 위한 ECU로서 엔진운전 중에 연료분사시기 및 연료분사량, 점화시기등 엔진의 제반 운전변수를 소프트웨어에 의해 변화시킬 수 있는 범용엔진 제어시스템(M8 ECU, MoTec Co.)을 사용하였다.

크랭크축의 회전각도 검출, 제어를 위하여 캠축에 엔코더를 연결하여 기준 신호로 사용하였다. 연소압력을 취득하기 위하여 1번 실린더에 압력센서를 장착하였다. 또한 광역산소센서(UEGO Sensor, NGK Spark Plug Co.)를 배기다기관에 설치하여 배기가스 중의 산소농도에 따른 공연비를 구하였다.

유동의 변화를 주기 위한 스윙조절밸브는 두께 1mm의 동판으로 실린더 헤드와 흡기매니폴드 사이에 장착하였다.

배기가스의 계측을 위하여 배기가스 분석기(EXSA-1500 Horiba Co.)를 배기관에 설치하여 촉매 변환전의 배기가스를 샘플링 하여 분석하였다.

압축천연가스 연료공급시스템의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. CNG 연료시스템은 22MPa로 고압으로 충전된 실린더에서 압력레귤레이터에 의해 감압되어 인젝터에 공급된다. 인젝터 구동신호에 따라 MPI용 CNG injector(MESA Co.)를 통해 각 실린더의 흡기포트 내로 분사된다.

인젝터의 분사압력은, 체적효율의 저하를 최소화하면서 흡기유동에 영향을 미치는 않는 범위에서

참고문헌을 고려하여 0.7MPa로 설정하여 분사하였다.¹⁹⁾

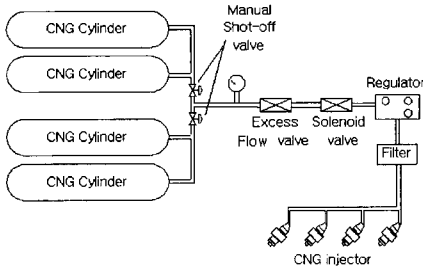


Fig. 2 CNG fuel system of experimental apparatus

2.2 스윙조절밸브⁶⁾

Fig. 3은 실험에 사용된 스윙조절밸브의 대표적인 형상을 각각 나타낸다. 정상유동 실험을 통하여 스윙비 및 텀블비를 측정 한 후, 이를 실험의 변수로 채택하였다. 정상유동의 실험결과를 Table 2에 나타내고 있다.

본 연구에서는 엔진헤드와 흡기매니폴드 사이에 두께 1mm인 3종의 스윙조절밸브를 설치하였다. 또한 스윙조절밸브를 부착하지 않은 경우를 BASE형으로 하고, 부착하는 스윙조절밸브의 형상에 따라 상대적으로 높은 텀블비와 스윙비를 갖는 스윙조절밸브를 부착한 경우를 SCV-A형, 높은 텀블비와 낮은 스윙비를 갖는 경우를 SCV-B형, 텀블비와 스윙비가 모두 낮은 경우를 SCV-C형으로 표시하였다.

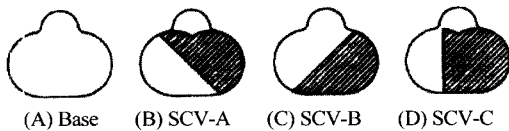


Fig. 3 The shape of swirl control valves

Table 2 Swirl and tumble ratio of SCV's

Configuration	Tumble ratio	Swirl ratio	Open ratio	Tumble angle
Base	2.054	0.000	100%	90.0°
SCV-A	2.138	1.182	55%	65.5°
SCV-B	2.224	0.341	55%	75.9°
SCV-C	2.016	1.088	37%	61.5°

3. 연구결과 및 고찰

3.1 점화시기 변화에 따른 영향

Fig. 4는 점화시기에 따른 토크값을 나타낸 것이다. 기관회전수 2000rpm, $\lambda=1.0$ 과 스로틀밸브 개도율을 20%로 고정한 상태에서 점화시기에 따른 토크값을 측정 한 것이다.

최대토크는 BTDC 25~33° 부근에서 발생하는 것을 볼 수 있다. 이론공연비 조건에서는 스윙조절밸브를 장착한 경우가 다소 토크가 떨어지는 경향을 보였다.

Fig. 5는 점화시기의 변화에 따른 배출가스의 특성을 나타낸 것이다.

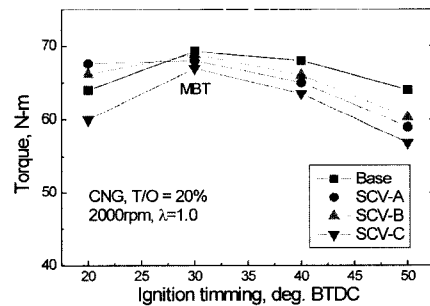


Fig. 4 Effect of ignition timing and SCV configuration on brake torque

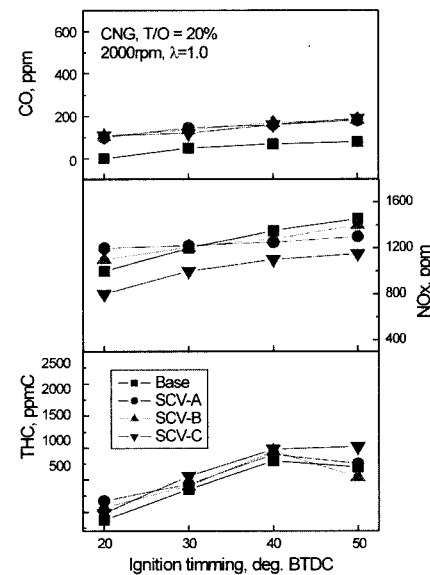


Fig. 5 Effect of ignition timing on emissions according to SCV configuration

점화시기가 CO생성에 미치는 영향은 적다. 점화시기가 진각됨에 따라 30-50ppm 정도 증가하였다.

NOx는 점화시기가 진각됨에 따라 최고압력발생시점이 TDC부근에서 일어나므로 급격한 연소로 NOx의 배출농도는 증가하는 경향을 볼 수 있다.

THC는 점화시기가 진각됨에 따라 배출농도가 증가하다가 BTDC40°에서 최대값을 보인다. 이보다 더 진각된 조건에서는 다시 감소하는 경향을 보이고 있다.

SCV를 장착한 경우 점화시기에 대한 배출특성은 이론공연비 조건에서는 베이스에 비해 CO와 THC는 10-15%정도 증가하였고, NOx는 2-20% 정도 감소하였다.

3.2 당량비 변화에 따른 영향

Fig. 6은 흡입유동변화에 따른 연소특성을 보기 위하여 스윙조절밸브 및 당량비에 대한 토크의 값을 나타낸 것이다. 기관회전수 2000rpm, 스로틀밸브의 개도율을 20%로 고정된 상태에서 MBT조건에서 연소실험을 하였다.

베이스엔진에서 CNG를 연료로 사용시 토크의 값은 가솔린에 비하여 평균 7~9%정도 감소함을 보였다. 이는 기체연료의 사용에 따른 체적효율의 저하가 원인으로 생각된다. NG는 연료의 옥탄가가 가솔린에 비해 훨씬 높기 때문에(Gasoline RON:95, NG RON:130) 엔진의 압축비를 높일 경우 상술한 출력저하 문제를 해소할 수 있을 것으로 판단된다.⁷⁾

흡입유동변화에 따른 특성을 보면 SCV를 장착한 경우 농후한 영역에서는 베이스엔진에 비해 동등하거나 2%정도 낮은 값을 보이는 반면, 희박영역에서

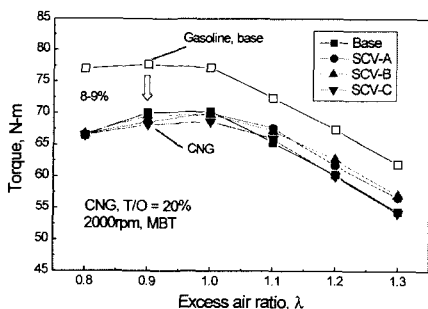


Fig. 6 Comparison of brake torque according to excess air ratio and factor and SCV configuration

는 토크가 1~5%정도 향상됨을 알 수 있다. 특히 SCV-A, B형 경우 희박영역에서 다른 경우에 비해 높은 토크의 값을 보이고 있다.

Fig. 7은 공기과잉률에 따른 연소최고압력과 연소최고압력의 변동계수를 나타낸 것이다.

연소최고압력은 이론공연비 부근에서 최대치를 보이며, 희박영역으로 갈수록 낮아짐을 볼 수 있다. 또한 연소안정성을 나타내는 변동계수에서도 4~8%정도로 비교적 안정된 연소를 보여주고 있다.

SCV를 장착한 경우 연소최고압력은 다소 낮아졌다. 이는 유동변화를 주기 위해 흡기관의 일부를 차단함으로써 어느 정도의 체적효율의 저하를 초래한데 그 원인이 있을 것으로 생각된다.

그러나 SCV를 장착함으로써 사이클 변동계수가 줄어들었고, 예시 외의 IMEP의 변동계수의 결과에서도 동일한 결과를 보임에 따라 연소안정성이 향상되는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 SCV를 장착한 상태에서 공기과잉률에 따른 연소시간을 나타낸 것이다. 연소시간은 취득한 연소압력으로부터 열해석을 통한 질량연소율에서 구하였다.

연소시간을 총연소시간과 점화지연시간으로 구분하여 나타내었을 때 점화지연시간은 베이스와 비교하면 대등하거나 3~4°deg. 정도 길어지는 경향을 보이고 있다. 이는 난류강도의 증가로 화염핵이 확산되고, 열전달에 의한 냉각작용에 의하여 화염핵의 성장에 장애요인으로 작용한 것으로 판단된다.

총연소시간은 공기과잉률 $\lambda \leq 1$ 조건에서는 연소구간이 비슷하지만 희박한 영역으로 갈수록 연소구간이 늘어남을 알 수 있다.

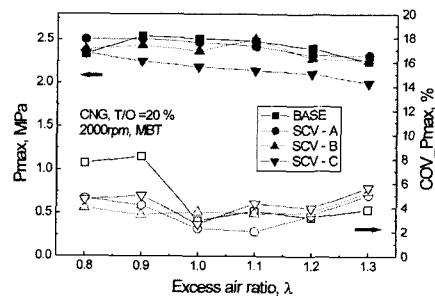


Fig. 7 Relationship between Pmax, COV_pmax and excess air ratio according to SCV configuration

스윙조절밸브를 사용한 조건에서 베이스엔진에 비해 8~10°deg. 정도 연소기간이 단축되었다. 스윙비가 다소 높은 SCV-B와 SCV-A의 조건이 빠른 연소속도를 보였다. 그 결과 SCV를 장착한 경우 MBT의 점화시기가 5~15°deg. 정도 진각되었다.

이 결과로부터 텀블유동이 지배적인 유동장에 스윙유동이 가미됨에 따라 난류강도 증가에 따른 급속연소가 가능하고, 안정된 연소를 할 수 있다.

Fig. 9는 유동변화 및 공기과잉률에 따른 배기가스 온도와 유해배출가스의 배출농도를 나타낸 것이다. 배기가스의 온도는 이론공연비 부근에서 가장 높게 나타난다. 또한 공기과잉률이 희박한 영역에

서 배기가스온도가 크게 저하함을 알 수 있다. 유동변화에 대한 배기가스 온도 변화는 베이스와 비교하면 10~20℃ 정도 낮은 값을 보였다.

CO의 배출농도 경향은 $\lambda < 1$ 인 농후 혼합기 영역으로 갈수록 급격히 증가하고, $\lambda > 1$ 인 희박혼합기 측에서는 거의 10ppm 이하의 낮은 배출농도를 보였다. 유동변화에 대한 CO의 배출농도는 베이스에 비하여 10~15% 정도 저감되는 효과를 보였다.

THC의 배출농도 경향은 $\lambda < 1$ 인 농후혼합기에서 이론공연비 부근으로 갈수록 완만히 감소하다가, 공기과잉률 $\lambda \geq 1.2$ 인 보다 희박한 혼합기에서는 다시 완만히 증가하는 경향을 보이고 있다. SCV를 장착한 경우 베이스에 비해 THC의 배출농도는 5~8% 정도 증가하는 경향을 보이고 있다. 난류강도의 증가로 급속연소가 이루어짐과 동시에 스윙유동의 특성상 화염전파는 연소실 벽면으로 활발하게 이동하게 된다. 연소실 벽면의 냉각작용을 받아 소염현상이 일어남으로써 THC의 배출농도가 증가하는 것으로 판단한다. 아울러 CNG는 가솔린에 비해 많은 산소량(gasoline (A/F)s = 14.7, CNG (A/F)s = 17.2)을 필요로 함으로 급속연소 이후의 산소농도가 줄어들어도 그 원인으로 추정된다.

NOx의 배출가스의 농도는 공기과잉률 $\lambda = 1.1$ 의 다소 희박한 혼합기 조건에서 최대치를 보이면서, 그보다 희박한 혼합기나 농후한 혼합기 측으로 갈수록 감소하는 경향을 보여주고 있다. SCV 장착한 경우 NOx의 배출농도는 10% 정도 증가하였다. 이는 SCV를 장착하면서 난류강도의 증가로 급속연소가 이루어짐을 입증하는 결과라고 생각한다.

제동토크, 연소기간에 대한 결과와 배출가스의 배출특성을 종합할 때 텀블유동에 지배적인 유동장에 스윙유동을 가미함으로써, 주연소기간의 단축으로 토크의 증가를 초래하였다. 반면, 급속연소로 NOx는 10% 증가하였고, 스윙유동의 특성상 화염전파는 연소실 벽면으로 이동하게 된다. 연소실 벽면의 냉각작용을 받아 소염현상이 일어남으로써 THC의 배출농도도 증가하였다.

4. 결론

CNG의 느린 연소속도를 극복하기 위하여 흡입

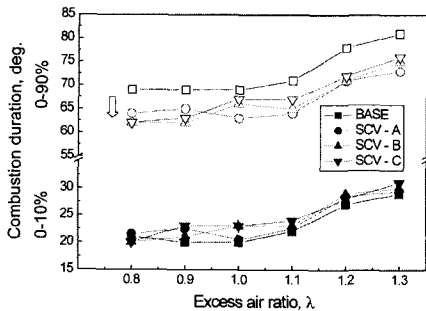


Fig. 8 Relationship between combustion duration and excess air ratio according to SCV

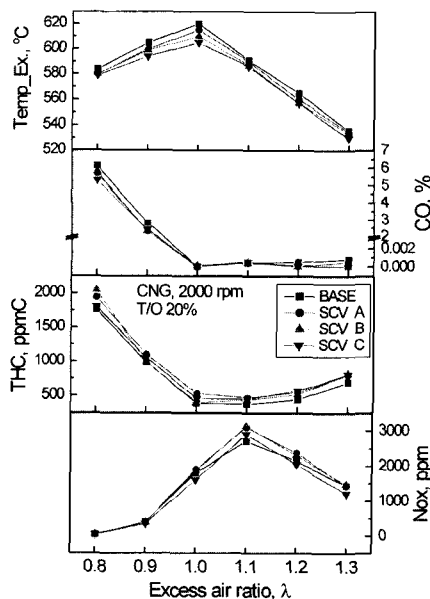


Fig. 9 Effect of excess air ratio on emissions according to SCV configuration

유동을 변화시켜 난류강도에 따른 CNG엔진의 연소특성 및 배출가스의 특성을 파악하기 위하여 실험한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1) 텀블유동이 지배적인 연소실에 스월유동을 가미하여 난류강도를 증가시킴으로써 주연소기간이 8-9deg.정도 단축되는 급속연소가 가능해졌다.

2) SCV를 장착한 경우, 제동토크는 $\lambda=1$ 조건에서 최대값을 보였고, 희박한 혼합기 영역에서는 베이스에 비해 5%정도 향상된 토크값을 보였으며 연소안정성도 향상되었다.

3) SCV를 장착한 경우, 급속연소로 NO_x의 배출농도는 10% 증가하였고, 가미된 스월유동의 영향으로 화염전파는 연소실 벽면으로 활발하게 이동하게 된다. 연소실 벽면의 냉각작용을 받아 소염현상이 일어남으로써 THC의 배출농도도 5~8% 증가하였다.

4) 연소특성과 배기가스 특성에서 SCV-B형이 우수한 성능을 보인 반면, SCV-C의 경우 개도율이 낮아 토크저하를 초래하였다.

References

- 1) H. J. Han, "Study of Diffusion Activation Plan for Low Emission Fuel Vehicle," KEI, 1996.
- 2) NGV 94, International Gas Union, 1994.
- 3) G. J. Waldron, R. G. Allen, "Natural Gas of Vehicles (NGV)," SAE 912558, 1991.
- 4) R. J. Tabaczynski, "Turbulence and Turbulent Combustion in Spark-Ignition Engines," Prog. Energy Combust. Sci., Vol.2, pp.143-165, 1976.
- 5) H. Kudow, H. Yamamoto, L. Lita, "A Study about In-Cylinder Flow and Combustion in a Four-Valve SI Engine," SAE 920574, 1992.
- 6) B. S. Kim, Y. J. Lee, C. J. Koh, "Performance Characteristics of CNG Vehicle at Various Compression Ratios," Journal of KSAE, Vol.13, No.2, 1991.
- 7) "Development of Conversion Technology of Small van to High Efficiency CNG Sole Vehicle," KIER-991404, 1999.