

대형 LPG 엔진의 흡입 스월비에 따른 연소성능에 관한 연구

The Effect of Intake Swirl Ratios on Combustion Performance in a Heavy-Duty LPG Engine

한 병 주*, 김 창 업**, 강 건 용**, 이 창 식***
Byeongjoo Han, Changup Kim, Kernyong Kang, Changsik Lee

ABSTRACT

To optimize the intake flow condition in the heavy-duty LPG SI engine, five different swirl ratios of intake port were investigated experimentally by oil spot method, LDV and single cylinder engine test. The flow characteristics near the piston surface were observed by oil spot method and magnitudes of swirl flow were measured quantitatively by LDV method in the steady flow rig. The engine performances of various swirl flow were also tested with the heavy-duty LPG SI single cylinder engine.

In the results, high swirl ratio, above $R_s=2.3$, was not suitable to develop a stable flame kernel and to produce high engine performance. Especially it was more serious under lean burn conditions, since turbulence intensity was smaller than bulk flow though those are increased together. These results were also confirmed by LDV measurement and oil spot method. On the contrary, low swirl ratio($R_s=1.3$) is not good to propagate a flame since the turbulence intensity and bulk flow are vanished during compression stroke and low swirl ratio has too weak initial energy for stable combustion. Therefore, the optimized swirl ratio for the heavy-duty LPG engine in this work was found around $R_s=2.0$.

주요기술용어 : Swirl ratio(스월비, R_s), Oil spot method(유점법), Steady flow rig(정상 유동 실험장치), LDV(레이저 유속계)

Nomenclature

C_f	: flow coefficient
IMEP	: indicated mean effective pressure
N_r	: non-dimensional rig test
λ	: air excess ratio
τ	: impulse meter torque [Nm]
α	: intake valve time [radian]

* 회원, 한양대학교 대학원

** 회원, 한국기계연구원 LP가스엔진연구사업단

*** 회원, 한양대학교 기계공학과

1. 서 론

기존의 가솔린과 디젤에 의존하던 자동차용 연료에 대한 대체연료로서 LPG(liquefied petroleum gas)가 소개되었으며 저렴한 가격, 전국적인 충전시설, 청정한 배기가스, 높은 에너지 밀도 등의 장점으로 인하여 활발한 연구가 진행되고 있다. 또한 최근에는 대형엔진에 LPG를 이용하는 연구 및 상용화의 예가 많아졌다.¹⁻³⁾ 대형 LPG 엔진의 SI(spark ignition) 연소는 유동

에 따른 연소특성 파악과 유동조건 최적화에 의한 연소성능 개선이 절실히 요구되는데, 특히 대형의 보어로 인하여 화염전파거리가 증가하므로 불완전 연소와 노킹이 발생할 가능성이 커지게 된다. 이를 방지하기 위한 가장 현실적이고 효율적인 접근 방법 중 하나가 흡입 유동을 최적화하여 연소에 필요한 강한 난류강도를 확보하는 것이다.^{4,5)}

본 연구에서는 대형 LPG엔진의 연소실 내 유동조건을 최적화하기 위해 연소실 내부의 유동에 중요한 영향을 미치는 흡입 스윙비의 변화에 대한 유동특성과 그에 따른 연소특성을 파악하고자 하였다. 이를 위해서 정상유동실험을 통하여 5가지 스윙비 조건의 흡기포트를 제작하였고 LDV(Laser doppler velocimetry)와 유점법(oil spot method)을 이용한 유동실험 및 단기통 엔진을 이용한 연소실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 정상유동실험

본 연구는 기존의 대형 디젤엔진을 LPG 엔진으로 개조하는 과정에서, 필요로 하는 스윙비 조건의 실린더 헤드를 가공하기 위해 Fig. 1 과 같은 정상유동 실험장치에서 스윙비 1.3, 2.0, 2.3, 2.8, 3.4의 5가지 헤드를 제작하였다. 스윙비 산출은 식(1)과 같은 Ricardo 방식을 사용하였는데 이를 위해 차압을 254mmH₂O로 일

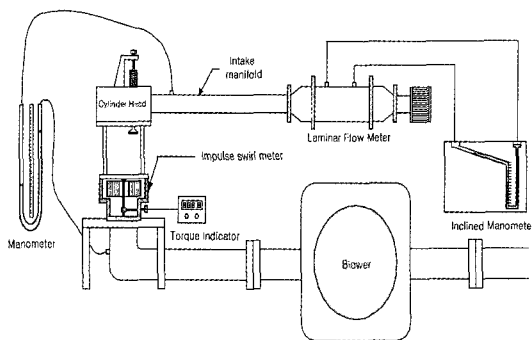


Fig. 1 Schematic diagram of steady flow test rig

정하게 유지하였다. 또한, 총류 유량계로 실린더에 유입되는 공기유량을, 임펄스 스윙미터(impulse swirl meter)로 실린더 내 스윙의 각 운동량(angular momentum)을 측정하였다.

$$R_s = \frac{\omega_c}{\omega_E} = \frac{L_D \int_{\alpha 1}^{\alpha 2} C_f N_R d\alpha}{[\int_{\alpha 1}^{\alpha 2} C_f d\alpha]^2} \quad (1)$$

여기서, LD: 형상계수(= $\frac{DS}{N_v d_v^2}$)

Cf: 유량계수(= $\frac{\dot{Q}}{AV_0}$)

NR: 무차원와류수(= $\frac{8\tau}{mDV_0}$)

S : stroke[mm]

D : bore diameter[mm]

\dot{Q} : volume flow rate[m³/s]

A : area of intake port[m²]

V₀ : maximum velocity through the intake port [m/s]

τ : impulse meter torque[Nm]

\dot{m} : mass flow rate[kg/s]

d_v : minimum valve diameter[mm]

$\alpha 1, \alpha 2$: intake valve opening, closing time[rad]

2.2 유점법(oil spot method)

5가지 조건의 스윙비에 대한 연소실 내에서의 유동특성을 정성적으로 파악하기 위해 유점법을 사용하였다. 유점법은 복잡한 엔진내의 유동을 피스톤 표면 부근의 평균유동의 형태로 나타내는 기법으로, 특히 압력, 온도, 밀도가 가장 높은 압축 TDC(top dead center) 근처에서의 유동을 주로 파악할 수 있다.^{6,7)} 사용된 시약은 유동 파라핀(liquid paraffin), 이산화 티탄(titanium dioxide), 올레인 산(oleic acid)을 혼합한 후 사용하였고 시각적인 효과를 위해 피스톤 상부를 검정색 페인트로 도색 하였다. 엔진구동은 WOT 상태로 800rpm에서 110초 동안 하였고 헤드 분리 후 결과 사진을 얻었다.

2.3 LDV 실험

본 연구에서는 정상유동 실험장치에서 스월비에 따른 유동특성을 정량적으로 파악하기 위해 LDV 실험을 수행하였다.

사용된 LDV의 제원은 Table 1과 같다. 실험장치는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 아르곤-이온(Ar-ion) 레이저, 광섬유 전송 트랜스미터, 3차원 이송장치(3D-Traverse), 신호처리기(Burst spectrum analyzer) 등으로 구성되었다. 흡기공급을 위해 송풍기(Blower)와 압축기(compressor)를 이용한 입자 공급장치, 측정대상인 정상유동 실험장치 등을 설치하였다. 또한 투명 아크릴 실린더를 장착하고 헤드면으로부터 180mm 위치에 광학창을 만들어서 측면에서 레이저 광을 입사할 수 있도록 하였다. 산란방식은 후방 산란법(backward scattering)을 사용하였다. 측정은 광학창에서 5mm 위치를 시작점으로, 10mm 간격으로 12포인트를 하였고 차압은 완전난류 조건인 254 mmH₂O로 일정하게 유지하였다.⁸⁾ 밸브리프트는 13.9mm의 최대로 하였다.

Table 1 Specification of LDV

Laser	5W, Ar-ion laser
Wave length	514.5 nm
Fringe spacing	4.08 μm
Beam separation	39.20 mm
Seeder	SiO ₂

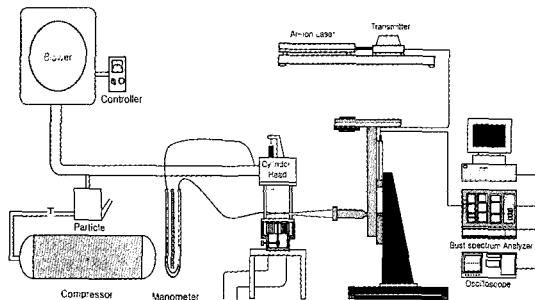


Fig. 2 Schematic diagram of LDV-steady flow rig

Table 2 Specification of test engine

Bore×Stroke(mm)	130×140
Displacement(cc)	1,858.17(1 cylinder)
Compression ratio	10
Fuel supply type	LPI

2.4 엔진연소실험

본 엔진연소실험에서 사용된 엔진의 제원을 Table 2에 나타내었다. 또 5가지 조건의 흡기포트에 대한 연소특성을 파악하기 위해 Fig. 3과 같은 실험장치를 사용하였다.

사용된 엔진은 실험변수의 조건변화가 용이하도록 6기통 중에서 1번 실린더만을 사용하는 단기통으로 개조되었다. 나머지 5개의 실린더는 회전 밸런스를 위해 피스톤은 장착하였지만, 압축은 되지 않도록 개방형 덮개로 막았다. 또한 실린더 헤드의 디젤연료 공급용 노즐이 있던 위치에 점화플러그를 장착하였다. LPG 연료를 액상으로 공급하기 위해 흡기포트에 액상분 사용 인젝터를 장착하였다. 연료량과 점화시기는 IC5460을 사용하여 조절하였고 공기유량은 총류 유량계를 사용하였다. 연료유량은 전자저울(balance)을 이용하여 측정하였으며 이를 배기라인의 UEGO(universal exhaust gas oxygen) 센서를 이용해서 검증하였다. 연소압력과 사이클 변동 및 연소속도 데이터 취득을 위해 S/P(spark plug)형 압력센서와 AVL 620 Indiset 연소해석 장치를 사용하였다. 또한 노킹(knocking) 관정을 위해 가속도 센서를 장착하였다. 실험은 1500 rpm 조건에서 압축비 10인 원형피스톤을 사용하였으며, 최적화된 점화시기를 적용하였다. 스월비 1.3, 2.0, 2.3, 2.8, 3.4의 5가지 조건에 대해서 각각 λ=1.0부터 1.5까지 공연비를 변화시키면서 실험하였다. 부하조건은 IMEP 6bar와 WOT의 2가지 경우로 하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 정상유동 실험장치에서 5가지 흡기

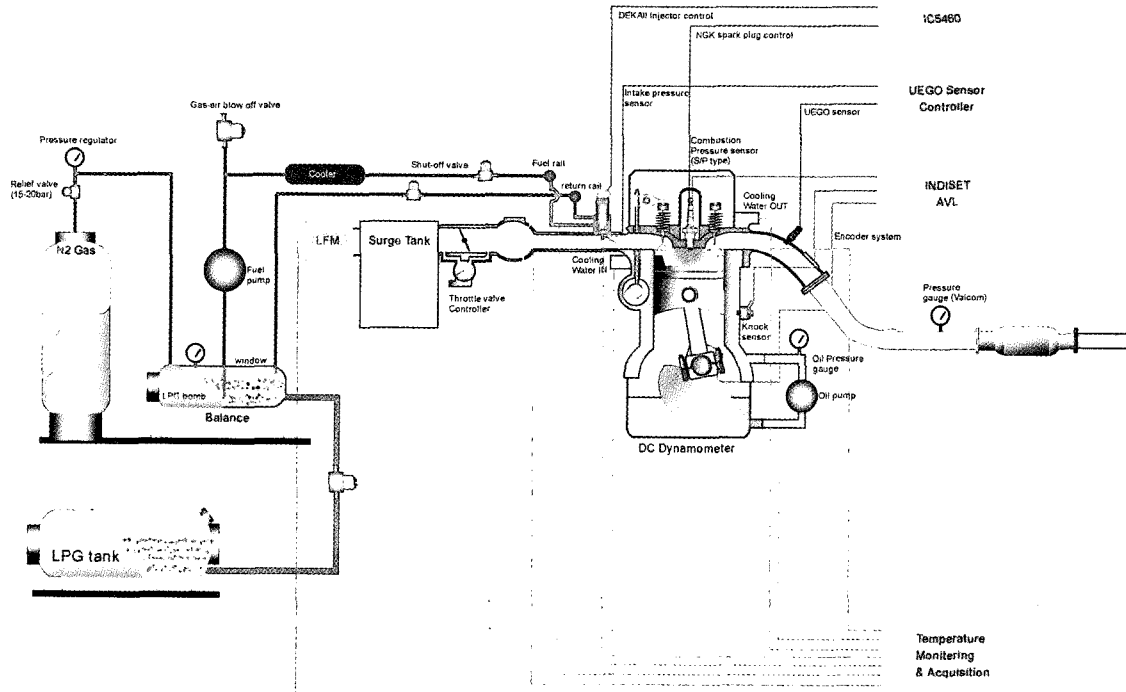


Fig. 3 Schematic diagram of a test apparatus

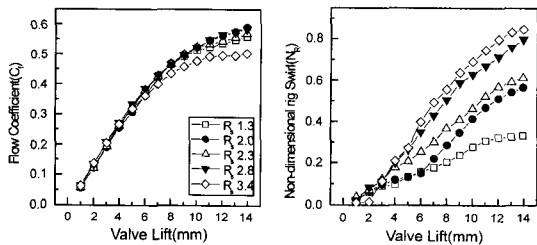


Fig. 4 Flow Coefficient and Non-dimensional rig swirl at the steady flow rig test

포트에 대해 수행한 실험결과로, 스월비 1.3, 2.0, 2.3, 2.8, 3.4를 얻을 수 있었다. 통상은 스월비의 증가에 대해 유량계수가 감소하는 경향이 있지만 본 실험에서는 스월비 3.4를 제외한 나머지의 경우 유량계수가 비슷한 것으로 나타났다. 이는 흡기포트 상단부에 덧살을 부착하여 선회 곡률반경 감소를 통한 스월비 감소를 유도하고, 하단부에 덧살을 부착하여 선회 곡률반경 증가를 통한 스월비 증가를 유도하였으므로

로 스월비 1.3과 같은 낮은 스월비에서도 유량계수의 증가가 발생하지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 단기통 엔진실험에서 부하조건에 따른 스월비간의 체적효율을 나타낸다. 체적효율은 IMEP 6bar의 중부하 조건에서 스월비의 변화에 따른 차이는 크지 않으며 공연비가 희박해짐에 따라 같은 출력을 내기 위한 체적효율이 증가하는 것을 볼 수 있었다. WOT일 때 스

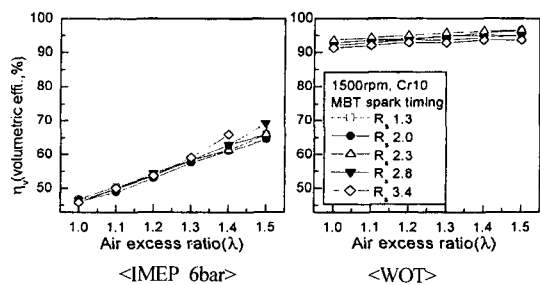


Fig. 5 Volumetric efficiency under lean burn conditions with various swirl ratios

월비간의 체적효율은 스월비 증감에 따라 선형적으로 변화하지 않는 것으로 나타났다. 이는 정상유동실험의 유량계수(Cf)와 경향이 비슷한데 가장 높은 경우(스월비 2.3)와 가장 낮은 경우(스월비 3.4)의 차가 3%정도로 나타났다.

Fig. 6은 엔진에서 유점법을 적용한 결과이다. 스월비 증가에 따라 유속이 증가하고 스월 중심이 피스톤의 중심 부근에 오는 것을 알 수 있다. 스월비 2.3 이상의 높은 스월비 조건에서는 스월유동의 속도가 급격히증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 추후 엔진실험시 열 손실의 증가로 효율에 악영향을 끼칠 것으로 예상된다.⁹⁾

Fig. 7은 정상유동장치의 헤드면으로부터 180 mm 위치에서 LDV로 측정된 스월비에 따른 유동특성을 나타낸다. 스월의 속도가 S자 모양을

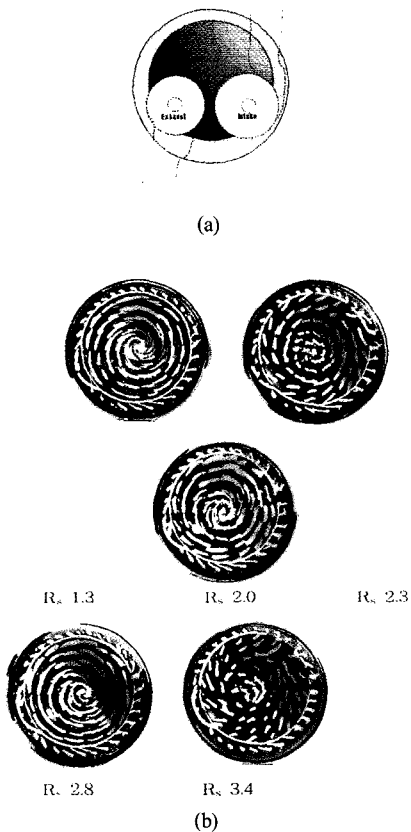


Fig. 6 Schematic diagram of piston(a) and the results of oil spot method(b) with various swirl ratios

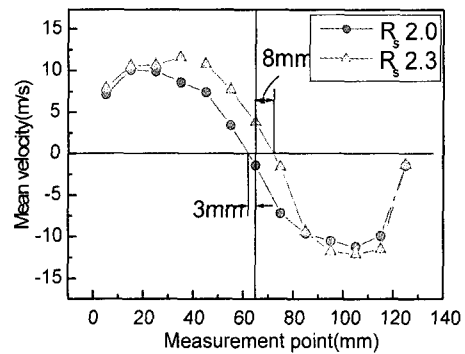
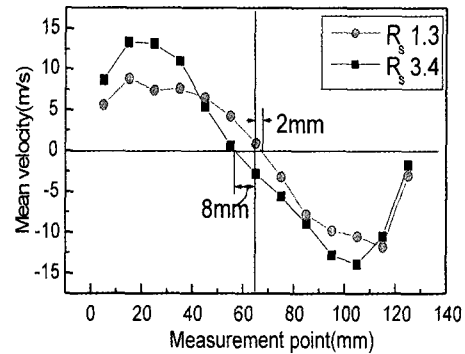
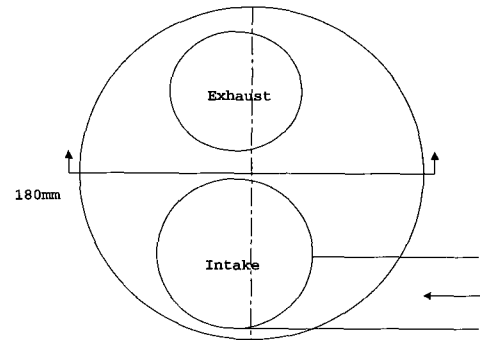
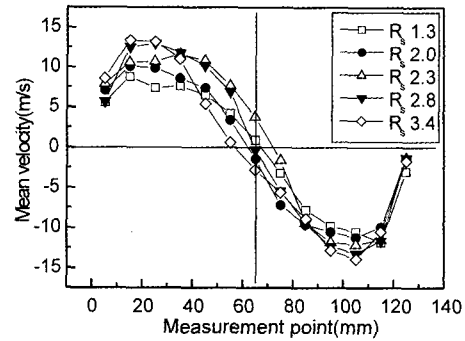


Fig. 7 The results of LDV measurement with various swirl ratios in the steady flow rig

하고 흡기포트 형상에 따라 시계방향으로 회전하는 것을 알 수 있다.¹⁰⁾ Table 3은 스월비에 따른 최대속도 폭과, 매 측정 지점에서의 속도와 스월 중심으로부터의 거리를 곱한 값인 각운동량(angular momentum)을 나타내었다. 스월비가 1.3, 2.0, 2.3, 2.8, 3.4로 점차 증가할 때 최대속도 폭의 증가율은 각각 3.3%, 10.1%, 9.5%, 4.0%로 나타났다. 특히 스월비 2.0, 2.3구간에서 증가율이 최대였는데 이는 스월비 2.3 이상에서 유속이 급격히 증가하는 Fig. 6의 결과와 일치하는 것을 알 수 있다.

위와 같은 유동특성을 가지는 5가지 스월비 조건의 흡기포트에 대해, 이를 직접 대형 LPG SI 엔진에 적용하여 연소성능을 비교하였다. Fig. 8은 5가지 스월비 조건에 대한 단기통 엔진 실험에서의 연소속도 결과를 점화시기부터 10% 연소의 화염발달기간, 10-90% 연소까지의 급속연소기간, 점화부터 90% 연소까지의 전체 연소기간으로 나타내었다. Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 화염발달기간은 IMEP 6bar 부하에서는 스월비 1.3, 2.0, 2.3의 경우가 짧고 2.8과 3.4의 경우는 길다. 이는 공기와 연료량이 적어서 연소환경이 불안정한 중부하 조건에서는 높은 스월비의 경우 빠른 유속이 화염핵의 성장에 악영향을 미치는 것으로 판단된다. WOT 조건에서는 스월비 1.3의 경우를 제외한 나머지의 경우에 짧은 화염발달기간을 나타내었다. 이는 공기와 연료량이 충분하여 연소의 활성화가 큰 상태에서는 스월비 2.0 이상의 경우와 같이 흡입공기의 운동에너지가 클수록 초기 화염발달

Table 3 The result of LDV measurement

스월비	최대속도폭(m/s)	Σ [속도(m/s)×반경(m)]
1.3	20.6	3.273
2.0	21.3	3.768
2.3	23.7	3.768
2.8	26.2	3.913
3.4	27.3	3.595

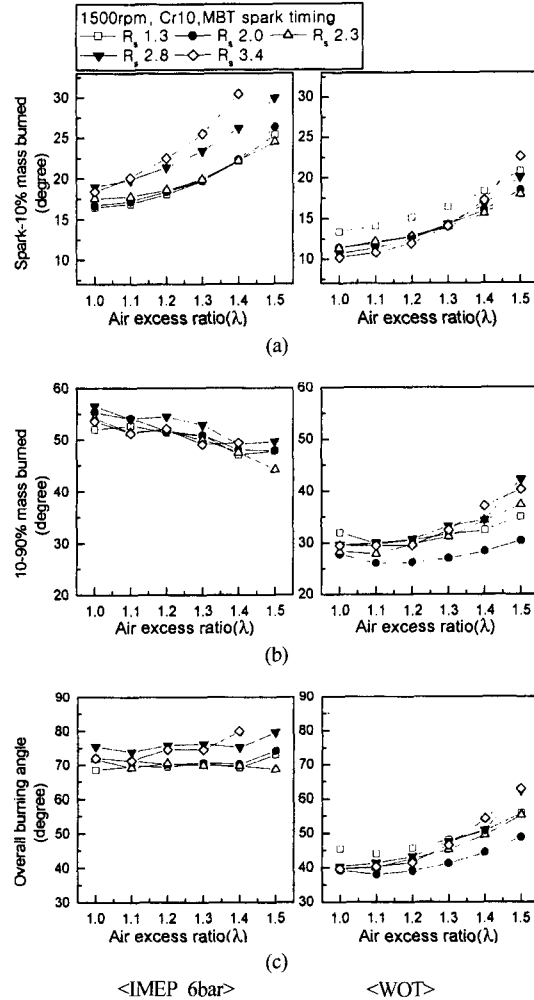


Fig. 8 Flame development angle(a), rapid burning angle (b) and overall burning angle(c) under lean burn conditions with various swirl ratios

에 유리한 영향을 주기 때문으로 판단된다. Fig. 8(b)의 급속연소기간은 IMEP 6bar 부하에서는 비슷한 값들이 나타났으나, WOT 조건에서는 스월비 2.0의 경우가 가장 짧은 급속연소기간을 보였다. 이는 스월비 2.0보다 높은 스월비의 경우, 빠른 유속으로 인한 열 손실을 발생하고 낮은 스월비는 흡입공기의 운동에너지가 압축과정에서 소멸되기 때문으로, 스월비 2.0의 경우는 적당한 유속으로 인한 최적의 난류강도를 확보했기 때문으로 판단된다. Fig. 8(c)의 점화

시기부터 90% 연소상태까지의 전체연소기간은 IMEP 6bar 조건에서는 스월비 2.8과 3.4의 고 스월비 경우가 연소기간이 길었으며 WOT 조건에서는 스월비 2.0이 가장 짧았다.

Fig. 9(a)에서는 스월비에 따른 연료 전환효율을 나타내었다. IMEP 6bar 조건에서 $\lambda=1.0$ 부터 1.3까지는 비슷한 값들을 보이지만, $\lambda=1.3$ 이후의 희박영역에서는 스월비 1.3, 2.0, 2.3의 조건에서 효율이 높게, 스월비 3.4의 경우는 효율이 가장 떨어지는 것을 볼 수 있다. $\lambda=1.4$ 의 경우, 효율이 가장 높은 스월비 2.0과 가장 낮은 3.4의 차이는 약 7% 정도였으며, 특히 스월비 3.4의 경우 $\lambda=1.4$ 조건에서 이미 희박운전 한계에 도달하였다. WOT 조건에서도 공연비가 희박해지면서 연료 전환효율이 증가하는 경향을 보였는데 스월비 1.3과 2.0의 저 스월비 조건이 전 공연비 영역에서 높은 효율을 나타내었고 스월비 2.3 이상의 스월비 조건에서 효

율이 가장 낮았다.

Fig. 9(b)는 스월비에 따른 사이클 변동률과 최고 연소압력 및 배기가스 온도를 나타내었다. 사이클 변동율은 IMEP 6bar일 때는 $\lambda=1.0$ 부터 1.3까지는 모든 스월비에서 2% 이하로 안정적이지만 $\lambda=1.3$ 이후에는 스월비 1.3, 2.8, 3.4의 경우 급격히 연소가 불안정해졌다. 반면에 연소가 활발한 WOT 조건에서는 전 스월비 조건에서 2% 이하의 안정된 값을 보였다.

Fig. 10(a)에서 최고 연소압력은 부하에 상관없이 스월비 2.0일 때가 가장 큰 값을 나타내고 스월비 2.8, 3.4의 경우는 낮은 연소압력을 나타냈는데 이러한 경향은, 특히 희박연소영역에서 뚜렷하였다. Fig. 10(b)에서 배기가스온도는 스월비 1.3일 때가 가장 높고 3.4일 때가 가장 낮는데 두 조건 사이의 온도차는 약 15°C에서 30°C 정도로 나타났다.

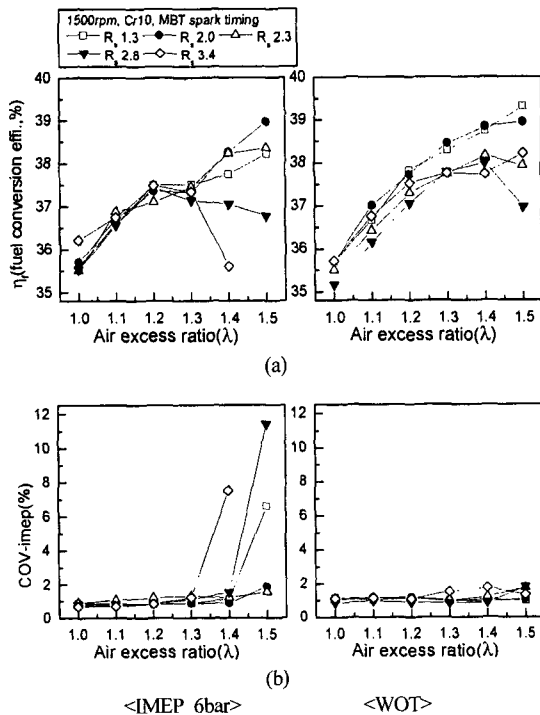


Fig. 9 Fuel conversion efficiency(a) and COV-imep(b) under lean burn conditions with various swirl ratios

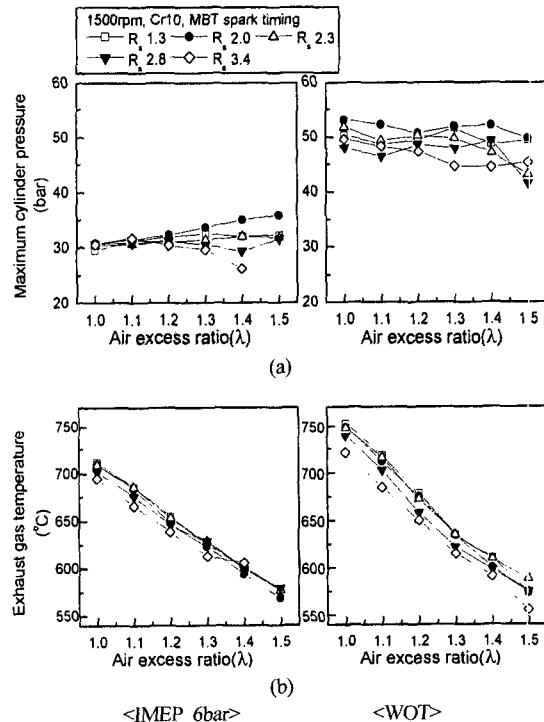


Fig. 10 Maximum cylinder pressure(a) and exhaust gas temperature(b) under lean burn conditions with various swirl ratios

4. 결 론

본 연구는 대형 LPG SI 엔진에서 스월비가 연소특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 스월비 1.3, 2.0, 2.3, 2.8, 3.4 등의 5가지 경우의 흡기포트에 대해 정상유동 실험과 LDV 실험을 수행했고 실제 엔진에서의 유점법 및 연소실험을 수행하였으며 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 유점법을 이용하여 스월 중심이 피스톤의 중심위치에 형성되는 것과 스월비 2.3 이후의 스월비에서 유속이 급격히 증가하는 현상을 가시적으로 알아낼 수 있었다.

2) LDV를 이용하여 스월비에 따른 유속을 측정한 결과, 스월비가 1.3, 2.0, 2.3, 2.8, 3.4로 점차 증가할 때 최대속도 폭이 최고 10.1%, 최저 3.3%까지 증가하였고 높은 스월비의 경우가 피스톤의 중심으로부터 멀어질수록 각 운동량이 최고 10.1%까지 증가하였다.

3) 5가지 스월비 조건을 대형 LPG SI 엔진에 적용한 결과, 연소기간 및 효율의 경우는 이론 공연비 영역에서는 스월비에 따라 큰 차이가 없었으나 희박영역에서는 지나치게 높은(2.8 이상) 스월비의 경우 초기 화염 핵의 형성과 발달에 불리한 영향을 미쳐 상대적으로 긴 연소기간과 낮은 효율을 나타내었다.

4) 사이클 변동률의 경우, 중부하 조건에서는 지나치게 낮은 스월비(1.3)나 높은 스월비(2.8, 3.4)의 경우에 큰 사이클 변동을 일으켰으며, 전부하 조건에서는 5가지 스월비 모두 변동률 2% 이하의 안정된 연소성능을 보여 주었다.

5) 본 연구에서 대형 LPG SI 엔진의 최적 스월비는 2.0 부근으로 확인되었다.

후 기

본 연구사업은 LPG 자동차 보급협의회(LG가스, SK가스)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감

사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) J. A. Caton, M. McEermott et al., "Development of a Dedicated LPG-Fueled Spark-Ignition and Vehicle for the 1996 Propane Vehicle Challenge", SAE 972692, 1997.
- 2) T. Sakural, M. Iko, K. Okamoto and F. Shoji, "Basic Research on Combustion Chambers for Lean Burn Gas Engines", SAE 932710, 1993.
- 3) X. Sun, T. Wiedmann and S. Hussain, "Fuel Management and Exhaust Emissions of Light- and Heavy Duty Trucks Operating on CNG and LPG", SAE 971661, 1997.
- 4) R. Sierens, "An Experimental and Theoretical Study of Liquid LPG Injection", SAE 922363, 1992.
- 5) B. Ahmadi-Befrui, W. Brandstatter and H. Kratochwill, "Calculation of Inhomogeneous-Charge Combustion in a Swirl-Assisted Lean-Burn Engine", SAE 910266, 1991.
- 6) S. Goto, D. Lee et al., "Performance and Emissions of an LPG Lean-Burn Engine for Heavy Duty Vehicles" SAE 1999-01-1513, 1999.
- 7) D. Y. Lee, J. Shakal, S. Goto and H. Ishikawa, H. Ueno and N. Harayama, "Observation of Flame Propagation in an LPG Lean Burn SI Engine", SAE 1999-01-0570, 1999.
- 8) C. R. N. Wotton, "Ricardo Steady Stat Flow-bench Port Performance Measurement and Analysis Techniques", 2nd August, 1993.
- 9) K. Hatsuda, T. Asanuma and M. Matsuki, "Handbook of Measurements in Internal Combustion Engines", p.64, Asakura 1979.
- 10) K. Y. Kang and R. D. Reitz, "Intake Flow Structure and Swirl Generation in a Four-Valve Heavy-Duty Diesel Engine", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.122, Oct. 2000.