

제3세대 LPLI 엔진 연소실내 스윙유동 및 희박연소 특성 해석

이진욱† · 강건용*

(원고접수일 : 2006년 6월 27일, 심사완료일 : 2006년 11월 14일)

Analysis of Cylinder Swirl Flow and Lean Combustion Characteristics of 3rd Generation LPLI(Liquid Phase LPG Injection) Engine

Jin-Wook Lee† · Kern-Yong Kang*

Abstract : The intake swirl motion, as one of dominant effects for an engine combustion, is very effective for turbulence enhancement during the compression process in the cylinder of 2-valve engine. Because the combustion flame speed is determined by the turbulence that is mainly generated from the mean flow of the charge air motion in intake port system. This paper describes the experimental results of swirl flow and combustion characteristics by using the oil spot method and back-scattering Laser Doppler velocimeter (LDV) in 2-valve single cylinder transparent LPG engine using the liquid phase LPG injection. For this, various intake port configurations were developed by using the flow box system and swirl ratios for different intake port configurations were determined by impulse swirl meter in a steady flow rig test. And the effects of intake swirl ratio on combustion characteristics in an LPG engine were analyzed with some analysis parameters that is swirl ratio, mean flow coefficient, swirl mean velocity, fuel conversion efficiency, combustion duration and cyclic variations of indicated mean effective pressure(IMEP). As these research results, we found that the intake port configuration with swirl ratio of 2.0 that has a reasonable lean combustion stability is very suitable to an 11ℓ heavy-duty LPG engine with liquid phase fuel injection system. It also has a better mean flow coefficient of 0.34 to develop a stable flame kernel and to produce high performance. This research expects to clarify major factor that effects on the design of intake port efficiently with the optimized swirl ratio for the heavy duty LPG engine.

Key words : Liquid phase LPG injection(LPLI, 액상 LPG 분사), Intake swirl flow(흡기 스윙 유동) Swirl ratio(스윙비), Back-scattering scheme(후방산란기법), Laser Doppler velocimeter(레이저유속계), Heavy-duty single cylinder LPG engine(대형 단기통 LPG엔진)

† 책임저자(한국기계연구원 친환경엔진연구센터), E-mail: immanuel@kimm.re.kr, Tel: 042)868-7386

* 한국기계연구원 친환경엔진연구센터

1. 서 론

현재 국내에서 상용화되고 있는 분사방식 및 믹서 방식의 LPG 연료시스템은 대부분 소형 가솔린 엔진을 대상으로 개발되고 있으며, 점차 중·대형 디젤 엔진을 대상으로도 이 방식이 진행되고 있다^[1]. 후자의 경우 LPG연료 특성상, 엔진외부 착화원(ignition source)인 전기점화방식을 채택해야 하기에, 압축비변경을 위한 엔진하드웨어 및 주변시스템의 개조 또는 새로운 제작이 필수적이다. 특히 기존 방식에 비해 엔진성능 및 배기가스 저감에 유리한 액상분사방식의 LPG MPI엔진을 개발하기 위해서는 연소 최적화기술과 관련부품 및 시스템 개발, 내구성 확보 등이 필수적으로 요구된다^[2]. 즉, 상대적으로 큰 연소실을 가지는 대형 디젤엔진을 대상으로 한 LPG MPI 엔진으로의 개조는 실린더 헤드, 피스톤 등의 연소계 및 인젝터, 연료라인 및 펌프 등의 연료계, 강제착화를 위한 스파크 플러그, 점화코일 등의 점화계와 전자제어를 위한 전장계 등 변경시스템에 대한 많은 설계기술을 필요로 한다^[3]. 이 중에서도 특히, 상대적으로 큰 크기의 실린더 보어(bore)를 갖는 연소실 조건에서 흡입 유동에 따른 연소특성을 파악해서 유동조건 최적화에 의한 LPG 연소성능 개선에 대한 연구는 매우 중요하다^{[4], [5]}. 따라서 본 연구에서는 LPG 액상분사용 전기점화방식 엔진에서의 실린더헤드내 흡기포트 형상에 따른 흡기(intake air) 스윙비별 스윙유동 및 연소특성을 해석하고자 수행하였다. 이를 위해 기존 11ℓ 급 대형 6기통 디젤엔진을 액상분사용 단기통 LPG 가시화엔진으로 개조하였다.

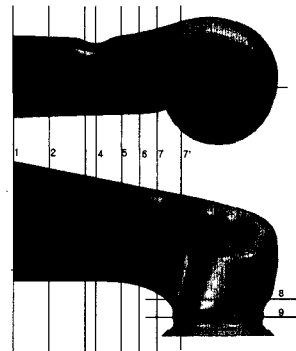
2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험 장치

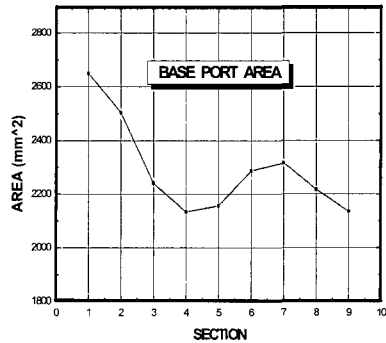
2.1.1 흡기포트 형상 제작 및 흡기 스윙비 계측

본 연구에서는 먼저, Fig. 1과 같이 기존 11ℓ 급 대형 디젤엔진의 흡기포트 형상을 레진을 이용하여 수지포트를 제작한 후, 흡기포트 형상에 대한 단면적 변화를 살펴보았다. 이후 제작된 수지포트 형상을 다양하게 개조(단면적 변화)하여 Fig. 2와

같은 흡기 스윙비 산출을 위한 유동실험용 실린더 헤드를 각각 별도로 제작하였다. 이 방법은 다양한 흡기포트 설계 방안을 적용할 수 있으며, 제작하는데 소요되는 시간도 비교적 짧기 때문에, 본 연구에서는 모두 17가지의 다양한 형상을 설계하여 제작할 수 있었다. 그러나 이러한 수지포트는 정상상태의 유동실험에는 적용할 수 있지만, 단기통 가시화엔진에는 적용할 수 없는 단점이 있다. 따라서 이의 보완을 위해 수지포트를 이용한 최적 설계개념과 실험결과 데이터를 활용하여, 실제 실린더 헤드에 직접 철 본드를 부착하여, 수지포트로부터 구한 흡입유동과 동일한 특성을 가지는 실린더헤드를 제작할 수 있었다. 이를 사용하여 실제 엔진 운전 조건하에서 액상분사용 LPG 단기통 가시화 엔진 실험에서는 각각 흡기 스윙비 1.3, 2.0, 2.3, 2.8 그리고 3.4의 흡기포트 형상을 가지는 실린더헤드를 대상으로 연구를 수행하였다.



(a) Configuration of intake port



(b) Variation of cross-section area

Fig. 1 Schematic of base intake port used in a heavy-duty diesel engine

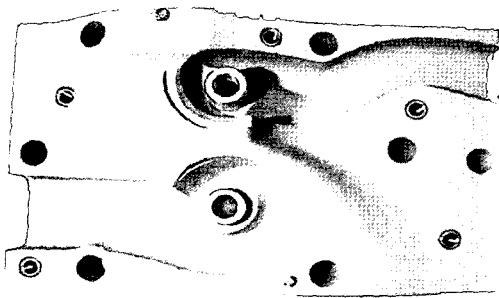


Fig. 2 Intake flow box made by resin port

이를 위해 본 연구에서는 Fig. 3과 같은 정상상태 흡기유동 실험 장치에서 임펄스 스윙미터(토크 센서내장)를 이용하여, 캠 형상 즉, 흡기밸브 양정(intake valve lift)에 대한 평균 유량계수를 실린더내에서 생성된 흡기의 각운동량에 대한 무차원 와류값과 무차원 흡입 공기량에 대한 비로 보정하여 리카르도 스윙값(Ricardo Swirl No. 이하 스윙비로 축약)를 산출하였다^[6].

2.1.2 스윙유동 가시화 및 속도 정량화

엔진 실린더내 스윙유동의 가시화를 위해 LDV시스템과 유점법(oil spot method)을 적용하였다.

엔진 정상상태 및 모터링상태 조건하에서 실린더내 스윙유동의 속도성분측정을 위해 사용한 LDV시스템은 5W 아르곤-이온 레이저(514nm의 초록색 빔), 광섬유 전송장치, 3차원 이송장치와 초점렌즈 푸르브 그리고 FFT방식의 신호처리기인 BSA(burst spectrum analyzer, Dantec)로 구성된다. 본 연구에서 적용한 LDV측정모드는 후방산란방식으로, 초점거리 310nm의 푸르브를 사용하여 측정체적의 플랜지 간격을 2.12 μ m로 할 수 있었다. 또한 사용된 산란입자는 평균입경이 1 μ m인 산화알루미나(Al₂O₃)를 사용하였다.

그리고 유점법은 피스톤 표면근처의 유체흐름을 가시화하기 위해 주로 행해지는 실험법으로써, 본 연구에서는 다양한 흡기 스윙비를 가지는 흡기포트 형상에 대하여 엔진 모터링상태 조건하에서 주로

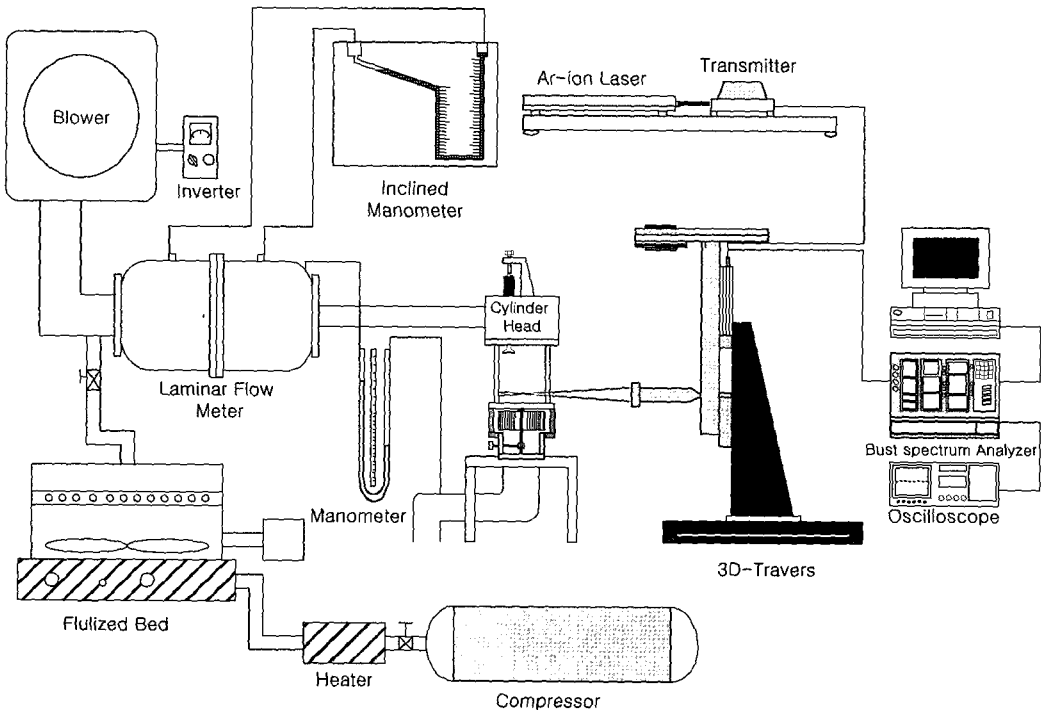


Fig. 3 Schematic of steady flow rig test with an impulse swirl meter for calculating the swirl ratio

적용하였다. 사용한 시약은 유동과라핀과 이산화탄 그리고 올레인산으로, 각각 18cc, 30g 그리고 2g의 정해진 비율로 혼합한 후, 피스톤 표면에 얇은 침으로 직경 1.5mm, 높이 1mm의 원형형태로 일정 간격으로 분포시켰다. 이 실험에서는 시약의 조성비가 매우 중요하며, 피스톤 표면에 나타난 형태는 시간적인 유체 흐름의 평균값을 의미한다.

2.1.3 흡기포트 형상별 LPG엔진 연소특성

LPG엔진 연소성능 해석을 위해 사용된 엔진은 실험번호 등의 조건변화가 용이하도록 Table 1에 나타난 바와 같은 단기통 엔진을 제작하였다.

Fig. 4에서 보듯이 제작된 단기통 엔진에는 실린더 헤드의 디젤연료 공급용 노즐이 있던 위치에 점화플러그를 장착한 것과 LPG연료를 액상상태로 공급하기 위해 흡기포트에 LPLI용 인젝터를 장착한 특징이 있다.

엔진 실험시, 연료량과 점화시기는 IC5460을 사용하여 조절하였다. 공기유량 측정은 층류 유량계를

사용했고, 연료유량은 전자저울을 이용해서 측정하였으며, 이를 배기 라인의 UEGO(universal exhaust gas oxygen)센서를 이용해서 검증하였다.

그리고 연소압력과 사이클 변동 및 연소속도 등의 데이터 취득을 위해 점화플러그형 압력센서와 AVL620 INDISET 연소해석장치를 사용하였고, 노킹판정을 위해 가속도센서를 실린더블록에 별도로 장착하였다^[7].

Table 1 Specification of a single cylinder LPG engine

| Type | LPG, 4-cycle |
|---------------------|----------------|
| Bore×Stroke(mm) | 130×140 |
| Displacement(cc) | 1.857 |
| Max. Speed(rpm) | 2,000 |
| Combustion type | Spark ignition |
| Fuel injection type | LPLI |

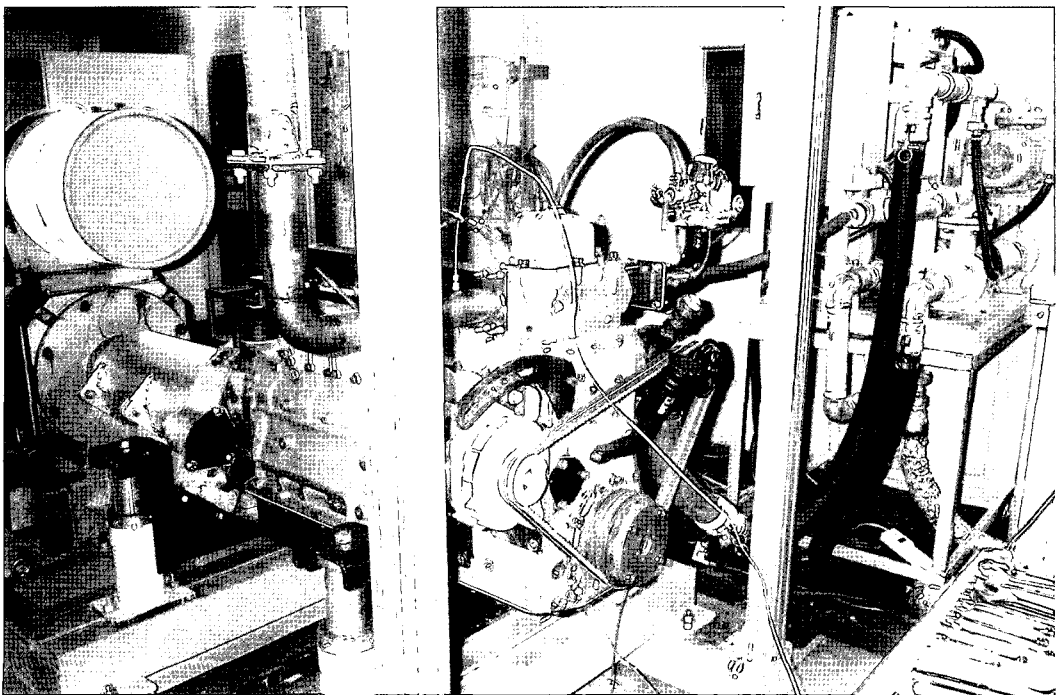


Fig. 4 Photograph of single cylinder LPG engine test with LPLI fuel injection system

2.2 실험 방법

정상상태 엔진유동실험에서는 엔진 실린더내 스월비 산출을 위해 모두 17개의 흡기포트 형상에 대한 실험을 수행하였으며, 3개의 특정 영역별로 스월비를 분류하였다. 이를 대상으로 해서, 유점법을 이용한 스월유동 가시화 실험과 LDV측정을 통해 스월 속도 계측실험을 병행하였다. 단기통 엔진연소실험에서는 엔진회전속도 1,500rpm조건에서 압축비 10인 원형 피스톤을 사용하였으며, 점화 시기는 MBT(minimum spark advance for best torque)로 설정하였다. 스월비 1.3, 2.0, 2.3, 2.8, 3.4 등의 5가지 조건에 대해서 각각 $\lambda=1.0$ 부터 1.5까지 공연비를 변화시키면서 실험을 수행하였으며^[8], 적용한 부하조건은 지시평균유효압력 (IMEP) 6bar와 전부하(wide open throttle, WOT)상태이다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 17개의 서로 다른 흡기포트 형상별 (Type 1~7: 유량계수를 일정하게 하면서 스월비를 증대하는 목적으로 흡기포트 설계, Type 8~11: 유량계수를 일정하게 하면서 스월비를 감소시

키고자 하는 목적으로 흡기포트 설계, Type 12~17: 유량계수를 변화시키는 목적으로 흡기포트 설계) 실린더헤드에 대하여 임펄스 스월미터를 이용하여 측정된 평균유량계수와 스월비를 나타낸 것이다. 기존 11ℓ급 대형 디젤엔진용 실린더헤드에 적용된 흡기포트 형상을 기본으로 하여, 다양한 흡기포트 형상을 설계·제작할 수 있었으며, 스월비의 경우, 최저 0.7에서부터 최대 3.9까지 조절할 수 있었다. 이를 흡기포트 형상 설계 측면에서 살펴보면, 흡기 매니폴드를 통해 흡기포트내 거의 직선부로 유입된 흡기유동이 밸브가이드(스텝)를 지나 밸브 헤드부에 이르는 나선형 포트의 곡선부를 지날 때, 급격한 유동변동(유속 및 압력)을 동반하는 경계영역이 존재하는데, 본 연구를 통해 최적 스월비는 흡기포트내 이 지점에서의 효과적인 단면적 변화제어를 통해 수행될 수 있음을 정상상태의 유동실험을 통해 알 수 있었다(Fig. 6 참조). 그리고 평균유량계수의 경우, 약 0.31에서부터 0.44 범위 내에서 조절되어짐을 알 수 있는데, 이를 통해 실제적으로 사용 가능한 흡기포트 형상을 고려할 경우, 약 0.33부근의 값을 가지면서 다양한 스월비의 조절이 가능한 5개 실린더헤드(스월비/평균유량계수=1.3/0.32, 2.0/0.33, 2.3/0.34, 2.8/0.35, 3.4/0.31)를 대표적으로 선정할 수 있었다.

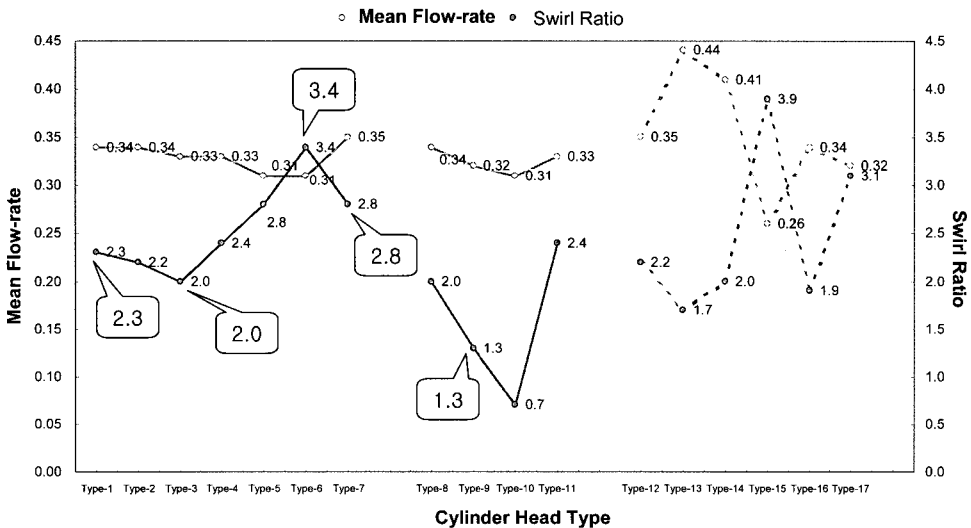


Fig. 5 Result of swirl flow test by using impulse swirl-meter

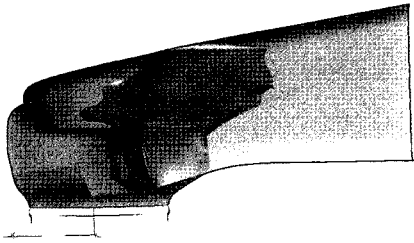


Fig. 6 Dominant area in intake port design

Fig. 7은 2가지 엔진부하조건에 대하여 5가지 흡기 스윙비들의 체적효율을 나타낸 것이다. 먼저, 전 부하조건에서는 전 공연비 구간에서 스윙비 2.8 이후부터 증가할수록 체적효율이 감소함을 알 수 있었다. 이는 비교적 일정한 유량을 유지하면서 (0.31~0.35) 스윙비 증가에 따라 고속으로 흡입되는 공기와 연료의 유동저항 및 흡기포트 설계형상에 따른 벽면의 마찰저항의 증가에 기인하는 것으로 판단이 된다. 그러나 부분부하조건인 IMEP 6bar일 경우, 공연비가 증가함에 따라, 스윙비 2.8이상인 경우, 체적효율이 증가되는 현상을 볼 수 있는데, 이는 부분 부하시, 흡기포트 형상의 고스윙비로 인해 흡기 스톨 밸브를 지나는 공기유량이 저스윙비에 비해 증가했기 때문이다.

이러한 결과는 스윙비가 증가할수록 흡기 스윙유동이 피스톤 중심에 위치하는 현상이 나타나기 시작하는 스윙비 2.3의 경우와 상대적으로 낮은 스윙비인 1.3에 대하여, 유점법과 LDV측정 결과를 나타낸 Fig. 8로부터 확인할 수 있었다. Fig. 8에서 보듯이 유점법에 의해 피스톤 표면에 표시된 유동거동으로 미루어 볼 때, 스윙비가 클수록 전체적으로 큰 스윙 속도분포가 존재하며, 스윙 유동의 흐름이 거의 깨지지 않은 채 뚜렷이 유지됨을 알 수 있었다.

그리고 LDV 측정위치인 연소실 중심에서 피스톤이 압축TDC 기준 뒤 방향으로 15mm지점의 원주방향 유속을 LDV로 측정된 결과, 상기 스윙비조건의 경우, 고스윙비일수록 크랭크 각도 160도 부근의 흡입과정 말기까지는 일정 방향의 흡입유량이 계속 유입되어 S자 형태의 스윙유동이 실린더 내에 생성되지만, 압축과정 중반에 있어서는 저스윙비일수록 피스톤 형상의 영향을 받아 스윙 유동의

변곡점이 생성됨을 알 수 있었다. 그리고 일반적으로 전기점화엔진에 있어서 예혼합된 공기와 연료가 실린더내로 들어와 점화플러그에 의해 연소가 진행될 때, 난류 예혼합 화염에 지대한 영향을 미치는 난류강도^[9]의 경우, 스윙비의 증가에 따라 피스톤내 강한 선회류가 생성됨으로써 속도 Gradient의 변화가 적어지고, 이에 따라 압축말기의 난류강도값의 굴곡이 없어지며, 비교적 일정한 값을 가짐을 알 수 있었다.

Fig. 9는 이론공연비 조건에서 스윙비 변화에 따른 연소성능 및 배기가스 온도를 나타낸 것이다.

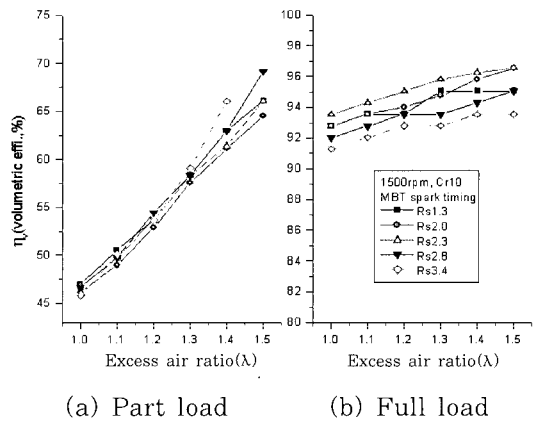
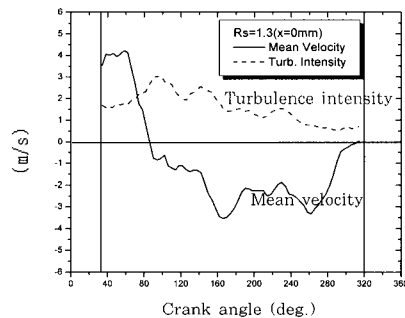
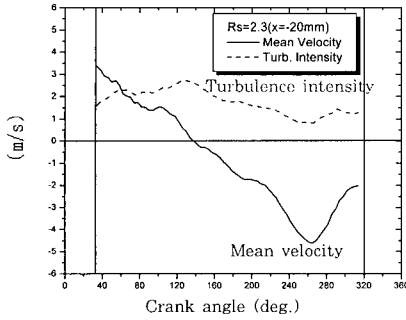


Fig. 7 Effects of different swirl ratio on the volumetric efficiency in single cylinder engine



(a) Swirl ratio : 1.3



(b) Swirl ratio : 2.3

Fig. 8 Comparison of LDV data with oil spot method

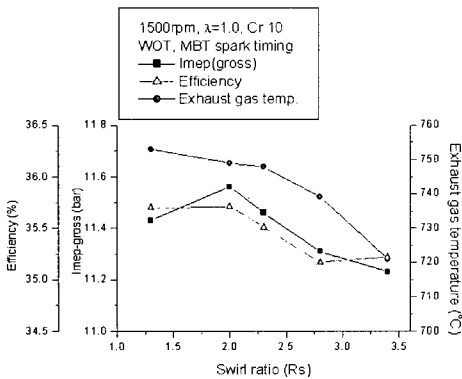
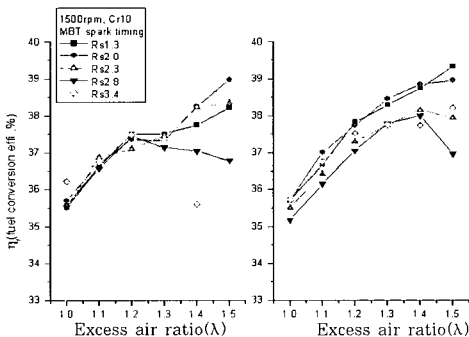


Fig. 9 Combustion performance at $\lambda=1$ and WOT



(a) Part load (b) Full load

Fig. 10 Effects of different swirl ratio on the fuel conversion efficiency in single cylinder engine

본 실험조건인 MBT 점화시기는 스월비가 클수록 더 진각이 되었는데, 이 진각된 MBT 점화시각 관점에서 볼 때, 너무 과도한 스월비의 경우, 이론 공연비 상태로 이미 형성된 혼합기의 급속연소에는 불리함을 의미한다. 그리고 스월비 1.3과 2.3 부근에서 안정적인 연소현상을 보이지만, 이러한 스월비 차이에 따른 변화폭은 매우 적는데, 이는 정상연소에 매우 적합한 연료와 공기가 모두 풍부한 이론공연비 조건이기 때문이다.

Fig. 10은 2가지 엔진부하조건에 대하여 5가지 흡기스월비에 대한 연료전환효율(fuel conversion efficiency)을 공연비 변화별로 나타낸 것이다. 여기서, 연료 전환효율은 열효율과 연소효율의 곱으로 표현될 수 있다^[10]. 전 부하조건시, 공연비가 증가함에 따라 연료 전환효율은 증가하는데, 특히 스월비 2.0인 경우, 가장 높은 효율이 됨을 알 수 있었다. 이러한 스월비 2.0에서의 상대적으로 높은 연료전환효율은 부분 부하조건에서도 비슷한 경향을 가짐을 알 수 있었다. 특히 고스월비와 고회박공연비 조건에서는 빠른 유속으로 인한 열손실이 발생된다. 이는 흡기과정에 생성된 스월유동의 흐름이 거의 깨지지 않은 채, 압축과정 동안에 유지됨으로써 균일한 혼합기를 형성하지 못했기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 회박연소 조건 및 상대적으로 연소가 원활히 진행되는 이론공연비 조건을 모두 고려해서 최적 스월비를 선정해 볼 때, 스월비 2.0 부근에서 최적 효율과 출력값이 나타나는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 11ℓ급 대형 디젤엔진용 실린더헤드를 액상분사방식의 LPG엔진에 적용하기 위해서, 기존 고스월비를 갖는 디젤 나선형 흡기포트 형상을 LPG 예혼합 연소에 적합한 흡기포트 형상별로 실린더내 스월유동 및 회박연소 특성을 해석한 결과, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 흡입유량계수의 감소를 최소화하면서 다양한 스월비를 가지는 흡기포트 형상을 설계할 수 있었으며, 특히 기존 흡기포트내 특정영역의 변경을 통해, 실제 실린더헤드에 적용 가능한 5가지 스월비 영역

(1.3, 2.0, 2.3, 2.8, 3.4)을 선정할 수 있었다.

(2) 실제 단기통 엔진에서 실린더내 스윙유동장을 유점법과 LDV측정을 적용한 결과, 스윙비 1.3을 제외하고는 스윙비가 증가할수록 큰 스윙 속도 분포가 존재하며, 스윙 유동의 흐름이 거의 깨지지 않은 채 뚜렷이 유지됨을 알 수 있었다. 특히 스윙비 2.3 이상의 경우, 압축말기에도 소멸되지 않는 벌크유동(bulk flow)의 존재로 균일 혼합기형성에 불리함을 판단할 수 있었다

(3) 엔진연소 실험결과, 스윙비 2.3이상인 경우, 이론 공연비 부근에서는 스윙비의 영향인 급속 화염 전파로 인해 열효율이 증가하지만, 공연비가 희박할수록 오히려 연소 불안정을 초래함을 알 수 있었다.

(4) 이상의 실험 결과들을 통해, 11ℓ급 대형 LPG엔진용 실린더헤드에 적용 가능한 1개의 나선형 흡기포트의 스윙비는 $\lambda=1.5$ 까지의 희박공연비 영역을 고려해 볼 때, 약 2.0부근이 가장 유리함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2006년 산자부 에너지·자원기술개발 사업(에너지관리공단)의 연구비 일부 지원으로 수행되었으며, 저자들은 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] Ir. Servaas Jaasma, "The Development of Heavy Duty LPI Systems", Vialle Technical Paper, 1998.
- [2] R. Sierens, "An Experimental and Theoretical Study of Liquid LPG Injection", SAE paper 922363, 1992.
- [3] H. Heisler, "Advanced Engine Technology", SAE international, 1994.
- [4] S. H. Woo, J. W. Lee, K. Y. Kang, K. H. Lee, "Analysis of Intake Port Characteristics for Swirl Flow Generation of Heavy-duty Engine", KSAE Autumn Congress, pp.320~325, 2000.
- [5] Fansler, T. D., "Turbulence Production and Relaxation in Bowl-in Piston Engine", SAE paper 930479, 1993.
- [6] C. R. Stone, N. Ladommatos, "The Measurement and Analysis of Swirl in Steady Flow", SAE paper 921642, 1992.
- [7] Shinichi Goto, Daeyup Lee et. al., "Performance and Emissions of an LPG Lean-Burn Engine for Heavy Duty Vehicles", SAE paper 1999-01-1513, 1999.
- [8] M. Steen, J. Rijke, J. Seppen, "Stoichiometric and Lean Burn Heavy-duty Gas Engine - A Dilemma between Exhaust Emission and Fuel Consumption?", TNO paper, VM 9605, 1995.
- [9] J. Weide, J. Seppen, J. Ling and H. Dekker, "Experience with CNG and LPG Operated Heavy Duty Vehicles with Emphasis on US HD Diesel Emission Standards", SAE paper 881657, 1988.
- [10] J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, pp. 85, McGraw-Hill Book Company, 1988.

저 자 소 개



이진욱 (李進旭)

1968년 6월생, 2005년 서울대 졸업(공학박사), 현 한국기계연구원 친환경엔진연구센터 선임연구원, 주요연구분야: 차세대 디젤분사시스템, 디젤 매연저감기술, 디젤 나노입자 해석, 청정가스 대체 연료 엔진



강건용 (姜建用)

1960년 3월생, 1995년 포항공대 졸업(공학박사), 현 한국기계연구원 친환경엔진연구센터 책임연구원, 주요연구분야: 대체연료 엔진 해석 및 실험, 차세대 자동차 엔진시스템 해석