

11L급 LPLi방식 대형엔진의 흡기스월비 최적화 연구

이진욱^{*1)} · 강건용¹⁾ · 민경덕²⁾

한국기계연구원 청정동력기계그룹¹⁾ · 서울대학교 기계항공공학부²⁾

Optimization of Swirl Ratio of Intake Port in 11L LPLi Engine

Jinwook Lee^{*1)} · Kernyong Kang¹⁾ · Kyoungdoug Min²⁾

¹⁾Engine R&D Group, Korea Institute of Machinery & Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

²⁾School of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received 23 January 2003 / Accepted 18 March 2003)

Abstract : The configuration of intake port is a dominant factor of inlet air flow and mixture formation in an engine. In this study, as an available technology to optimum intake port, the flow box system using resine has been applied. So we presents a methodology for estimating inlet flow characteristics in this paper. This quantified experimental result shows good agreements with visualization data in a cylinder. We obtained the optimal value of swirl ratio and flow coefficient under steady flow rig test for new development of intake port for heavy-duty engine. From this results, the cylinder head with a good evaluated swirl flow characteristics was developed and adapted for a 11L heavy-duty engine using the liquid phase LPG injection (LPLi) system. This research expects to clarify major factor that make the intake port efficiently.

Key words : Heavy-duty engine(대형엔진), Cylinder head(실린더헤드), Intake port(흡기포트), Swirl flow(스월류동), Swirl ratio(스월비), Mean flowrate(평균유량), LDV(레이저유속계)

Nomenclature

C_f : flow coefficient

N_R : non-dimensional rig swirl

R_s : swirl ratio

B : cylinder bore

λ : wavelength

1. 서론

대기환경 규제가 강화됨에 따라 저공해 엔진의 연구가 전 세계적으로 활발히 이루어지고 있는데, 그 중 한가지 방법으로 청정연료인 LP가스를 주연료로 하여 가솔린엔진과 마찬가지로 액상분무 시

스템을 갖춘 LPLi(liquid phase LPG injection) 엔진의 연구가 근래에 와서 상당히 많이 진행되고 있다. 현재 국내에서 상용화되고 있는 믹서방식의 LPG시스템은 대부분 소형 가솔린 엔진을 대상으로 개발되고 있으며, 점차 중·대형 디젤 엔진을 대상으로도 이 방식이 진행되고 있다. 후자의 경우 LPG연료 특성상, 엔진외부 착화원(ignition source)인 전기점화방식을 채택해야 하기에, 압축비변경을 위한 엔진하드웨어 및 주변시스템의 개조 또는 신작이 필수적이다. 특히 기존 방식에 비해 엔진성능 및 배기가스 저감에 유리한 액상분사방식의 LPG MPi엔진을 개발하기 위해서는 연소 최적화 기술과 관련부품 및 시스템 개발, 내구성 확보 등이 필수적으로 요구된다. 특히 상대적으로 연소실이

*To whom correspondence should be addressed.
immanuel@kimm.re.kr

큰 대형 디젤엔진의 LPG MPI 엔진으로의 개조는 실린더 헤드, 피스톤 등의 연소계 및 인젝터, 연료 라인 및 펌프 등의 연료계, 강제착화를 위한 스파크 플러그, 점화코일 등의 점화계와 전자제어를 위한 전장계 등 많은 변경 시스템에 대한 설계기술이 중요하다. 이 가운데 개발엔진의 흡기포트 설계는 저 배기가스 배출 엔진에 있어서 중요한 역할을 하는데,¹⁾ 반해, 지난 대부분의 연구내용에서 이에 대한 특성을 정립한 유용한 연구들은 상대적으로 적다. 대형엔진에 있어서 엔진 배출가스에 중요한 영향을 미칠 수 있는 흡입유동 최적화에 대한 연구시, 엔진 실린더내 유동장 형성과정중에서 연소과정에 영향을 미치는 압축말기상태의 난류강도 해석은 대단히 중요하다. 이는 흡입과정시 생성된 벌크유동이 압축과정을 거치면서 작은 스케일의 에디로 깨지면서 발생되거나, 연소실 형상에 따라 발생하는 스퀴시유동에 의해 생성된다. 그리고 개발엔진의 베이스 실린더헤드는 기존 가솔린엔진과는 달리, 평평한(flat) 형상을 가지고 있기에 피스톤의 형상 또한 중요하다. 이는 엔진출력에 영향을 주는 압축비를 고려하여 최적형상이 결정되어야 함과 동시에 연소의 안정화 측면에서도 고려되어야 한다.^{2,3)}

따라서 본 연구에서는 이상에서 밝힌대로 대형 흡기포트 및 피스톤의 최적화를 위해 수행된 실험적 방법 및 이에 대한 결과에 대해 중점적으로 논하고자 한다. 이를 위해서 수행된 연구분야는 크게 2개 분야로 나누어 진행되었는데, 첫번째는 1개 흡기 밸브를 가지는 실린더헤드의 흡기포트 형상 최적화를 위해 다양한 스윙비 산출 및 이의 실린더내 유동장을 정상상태조건하에서 해석하는 연구분야와 두번째는 이 중 최적화된 흡기포트 형상조건에 대해서로 다른 피스톤 형상에 따른 영향을 거시적으로 관찰하고, 이에 대해 주요영역에서 속도장을 비교·해석하는 분야이다. 이는 개발엔진이 희박연소방식을 채택하고 있기에, 최적의 스윙유동장을 생성시킴으로서 연소실내 생성된 난류강도의 상대적인 비교를 통해 연소안정화를 위한 기본데이터들로 활용하고자 함이다.

2. 최적 흡기시스템을 위한 요구사항

개발엔진에 적합한 연소실 핵심 구성품인 실린더 헤드의 최적 개발을 위해서는 다음과 같은 기술이 요구된다.

- 1) 점화플러그 장착부 신설
- 2) 점화플러그 부근의 열부하 개선을 위한 냉각수 유로 변경/확대
- 3) 고온 내마모성 밸브 및 밸브시트 장착
- 4) 흡기포트 형상 최적화
- 5) 헤드소재 열처리 강화

이 가운데서 실린더 헤드에 기존 디젤의 분사 노즐의 삭제와 강제착화를 위한 점화플러그의 신설, 공기연료의 mixing 개선과 공기이용률 향상을 위해 고선회비를 갖는 기존 디젤 헬리컬 포트에서 LPG 예혼합 연소에 적합한 최적 선회비를 갖는 흡기포트로의 변경은 개발엔진의 유동 및 연소에 있어서 중요한 역할을 한다. 특히 이러한 흡기포트 개발을 위해서는 흡기매니폴드의 최적화가 선행적으로 수행되어야 한다. 왜냐하면 LPG 연료의 다점분사 방식 채용에 따라 흡기매니폴드내에 인젝터를 설치하게 되기 때문인데, 본 연구에서는 흡기매니폴드내 흡입공기 분배성 향상을 위해 1-entry형태로 흡기매니폴드를 설계·변경하였다.

3. 실험방법

3.1 다양한 흡기포트 설계

본 개발엔진의 실린더헤드내 서로 다른 스윙비를 가지는 흡기포트를 제작하기 위해서는 크게 두가지 방법이 있는데, 그 중 한가지 방법은 레진을 이용하여 수지포트를 제작하는 방법(Fig. 1 참조)이고, 다른 방법은 실제 실린더 헤드의 흡기포트부에 철틀

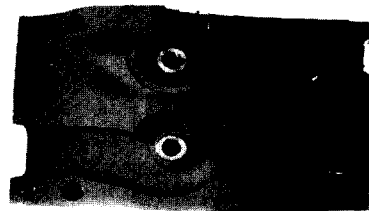


Fig. 1 Flow box by resin port

드를 부착하여 형상을 변경하는 방법이다. 하지만 수지포트는 정상상태의 유동실험에 적용할 수 있지만, 단기통 가시화엔진에는 적용할 수 없다. 따라서 엔진 모터링 운전조건하에서 단기통 가시화 엔진내 유동장 평가를 위해서 실제 실린더 헤드에 직접 철틀본드를 부착하여, 다양한 흡입유동 특성을 가지도록 하였다. 이들 형상의 특징은 흡기포트 주위의 냉각수 유로 및 단면적 그리고 흡기포트의 입구면적과 흡기밸브 시트링의 변경없이 오로지 흡기포트만의 변경으로 다양한 스월비를 얻도록 한 것이다.

3.2 정상상태시, 흡기포트 형상별 스월비 산출 및 스월유동 비교 실험

이상과 같이 다양한 형태로 제작된 흡기포트를 임펄스 스월미터를 이용해 스월비를 산출한 후, 정상상태 조건하에서 전반적인 실린더내 스월유동 특성을 알고자 레이저유속계(LDV)를 이용하여 해석^{4,5)}하였다.

3.2.1 스월비 산출실험

흡기포트 형상변화에 따른 스월비 산출을 위해서, 정상유동 상태시, 실린더내의 와류강도를 측정하여 그 결과를 상대 비교함으로써 우위를 결정하는 임펄스 스월미터를 이용한 실험에 바탕을 둔 일정차압 방식을 사용하였다. 스월비의 산출⁶⁾은 캠형상(valve lift profile)에 대한 평균 유량계수를 실린더내에서 생성된 흡기의 각운동량에 대한 무차원 와류값과 무차원 흡입 공기량에 대한 비에 보정하여 구했으며, 개발엔진의 형상계수도 적용하였다.

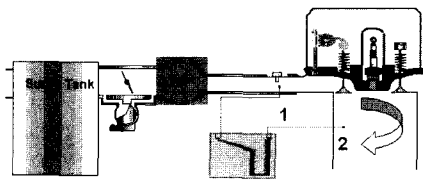


Fig. 2 Steady flow rig test

3.2.2 LDV적용 스월유동 비교실험

정상상태 조건하에서 실린더내 스월유동의 분포를 정량화하기 위해서 1-D LDV시스템($\lambda=514.5\text{ nm}$)을 적용하였다. 이를 위해 실린더내 광학창을 실

린더보어 크기를 ($\varnothing 130\text{ mm}$) 기준하여 실린더 헤드면으로부터 0.5배($0.5 * \text{Bore}$) 및 임펄스미터 위치인 1.75배($1.75 * \text{Bore}$) 지점에 각각 설치하였다.

3.3 엔진모터링상태시, 스월유동 분석 실험

단기통 가시화엔진의 운전조건인 모터링상태로 엔진을 구동시, 흡입 및 압축과정 동안의 엔진실린더내 유동장을 측정할 수 있는데, 이로부터 구한 난류강도와 초기 화염생성과 화염전파속도 및 구조사이의 상호관계를 구할 수 있어 이러한 엔진운전조건에서의 엔진유동해석은 매우 중요하다. 이를 위해 단기통 가시화엔진을 제작하여 우선, 유점법을 적용한 실험을 통해 전반적인 스월유동의 거동을 살펴보았다. 또한 흡기포트 형상별로 점화플러그 부근의 스월유동장에 대한 해석을 수행하였다. Table 1은 제작된 단기통 가시화 엔진의 제원을 나타낸 것이다.

Table 1 Specification of single cylinder transparent engine

Type	LPG, 4 cycle
Bore×Stroke(mm)	130×140
Combustion chamber	Bowl type
Displacement(cc)	1,857
Max.Speed(rpm)	2,000
Max. Pressure(bar)	100
Combustion type	Spark ignition
Range of liner visualization	BTDC60°~ATDC60°

3.3.1 단기통 가시화엔진내 유점법을 통한 정성적 스월유동 비교실험

실린더내의 정성적인 유동특성을 파악하기 위해 주로 행해지는 실험방법으로서 물체표면 근방의 유체흐름을 가시화하였다. 이 경우 스월비 1.3, 2.0, 2.3을 가지는 실린더헤드(3개)에 대하여 엔진 모터링 상태조건하에서 수행하였는데, 이 실험은 성분의 조성비가 중요하고, 나타낸 형태는 시간적인 유체의 평균값을 의미한다. 적용된 피스톤의 형상은 Fig. 3과 같다. 실험방법은 유동과라핀 18cc 와 이산화탄 30g, 그리고 올레인산 2g을 혼합하여 1주일후 사용하는데, 화상이 잘 보이게 하기위해 사용시 피스톤의 상부에 검은색으로 도색한 후, 얇은 칩으로 직

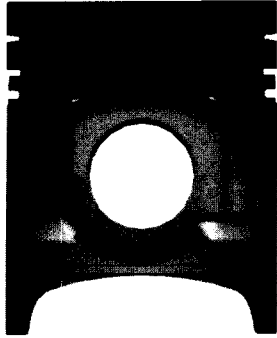


Fig. 3 Tested piston configuration

경 1.5mm, 높이 1mm의 원형을 만들었다. 그리고 엔진조립시 물과 오일이 닿지 않도록 조심하였다.

3.3.2 단기통 가시화엔진내 LDV적용 스월유동 정량적 분석실험

단기통 가시화 엔진내 LDV측정위치는 흡기밸브와 배기밸브의 사이를 기준으로 하여 점화 플러그가 위치되어 있는 곳을 중심좌표로 하여 실린더 헤드 게스킷으로부터 z-방향으로 15mm 떨어진 1개 단면상에서 x-방향으로 0mm, +20mm, -20mm 떨어진 지점에 대하여 측정하였다(Fig. 4 참조). 산란입자의 공급은 입자부유기에서 압축공기에 의해 부양된 입자들이 흡기매니폴드내의 부압에 의해 자연스럽게 흡입되도록 하였으며, 엔진 부하조건은 스톱 밸브를 완전히 개방한 WOT상태로 하였고, 엔진회전수는 500rpm으로 하였다. 산란입자는 평균입경이 1 μ m의 산화알루미나(Al_2O_3)를 사용하였다.

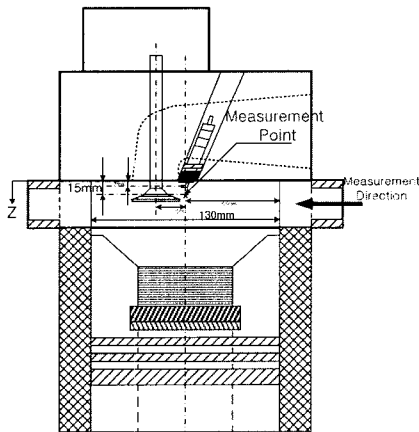


Fig. 4 LDV measuring point

4. 실험결과

4.1 정상상태시, 흡기포트 형상별 스월비 산출 및 스월유동 비교 실험결과

4.1.1 스월비 산출실험 결과

Table 2는 6가지의 서로 다른 흡기포트 형상별 실린더헤드에 대하여 임펄스 스월미터를 이용하여 측정된 평균유량계수와 스월비를 나타내었다. 스월비는 1.3에서 3.4범위내로 제어할 수 있었으며, 이때의 유량계수는 0.31에서 0.35내로 유지할 수 있었다.

Table 2 Mean flowrate and swirl ratio

Type	1	2	3'	4	5	6
Mean Cf	0.32	0.34	0.34	0.33	0.35	0.31
Swirl ratio	1.3	2.0	2.1	2.3	2.8	3.4

(* : 실제 개발엔진에 적용된 사양)

4.1.2 LDV적용 스월유동 비교실험 결과

Fig. 5는 실린더헤드 게스킷으로부터 z-방향으로 65mm, 227mm(스월비 산출위치)에 대하여 2가지 측

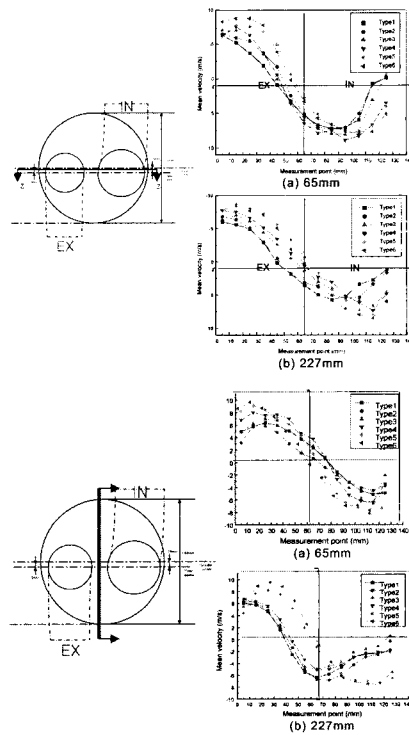


Fig. 5 Swirl flow profile under steady state condition

정방향별로 6가지의 흡기포트 형상에 따라 각 측정 단면에서의 평균유속을 10mm 간격씩 측정된 것인데, 실린더 상단부의 스월유동보다 임펄스미터를 사용하여 구한 스월비 산출위치인 227mm되는 곳에서 모든 포트형상에 대하여 상대적으로 유동이 강하게 나타나며, 스월비 증가에 따른 유속의 크기는 측정위치에 상관없이 전 실린더영역내에서 증가됨을 알 수 있었다.

Fig. 6은 대형실린더내 스월유동에 있어 흡기밸브의 영향을 알아보기 위한 것으로, 같은 측정위치에서 흡기밸브가 존재할 경우 강한 스월유동을 가짐을 알 수 있었고, 특히 저,중스월 흡기포트일 경우는 그 영향력이 상당히 지배적이었다. 즉, 고스월 영역의 흡기포트는 흡기밸브가 존재하지 않아도 포트 특성에 의한 유동에너지가 실린더내까지 지속되어 실린더 상단부부터 어느정도의 스월유동을 나타냄을 알 수 있었다.

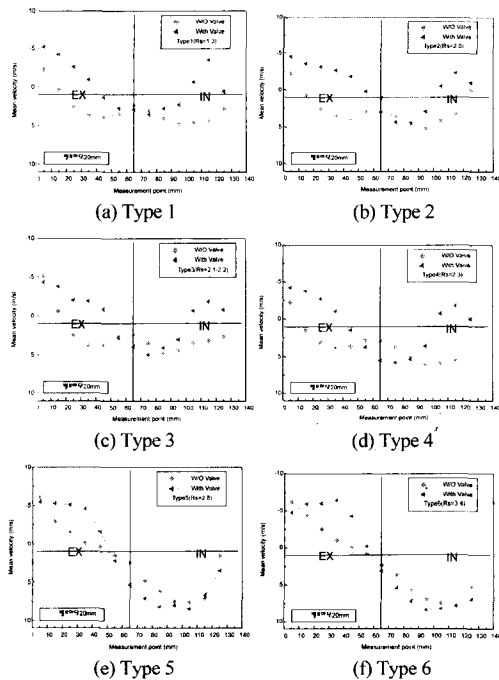
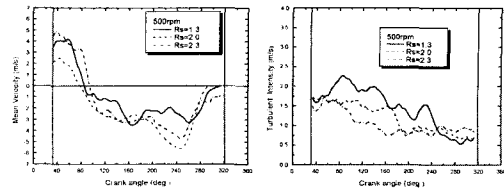


Fig. 6 Effects of intake valve for different swirl ratio

4.2 엔진모터링상태시, 스월유동 분석 실험결과

Fig. 7은 x=0mm지점에서 스월비 1.3과 2.0 그리고



(a) Mean velocity (b) Turbulence intensity
Fig. 7 Swirl velocity and turbulence intensity

2.3의 흡기포트에 대한 점화 플러그 부근에서 측정 한 스월유동의 평균속도 및 난류강도분포를 나타낸 것이다. 흡입초기에는 약 5m/s의 스월유동이 생성되다가 흡입말기로 갈수록 감소된다. 피스톤이 거의 하사점에 도달할 무렵에는 스월비 영향보다는 피스톤 형상의 영향으로 뚜렷하게 피스톤의 흡입공기 압축에 따른 유동패턴을 볼 수 있다. 특히, 스월비 2.0인 경우, 흡입초기에 상대적으로 낮은 스월속도를 보이고 있는데, 이는 다른 두개의 흡기포트에 비해 흡기밸브를 기준으로, 흡기포트가 약 10도 정도 편심되어 있어 LDV측정점인 점화플러그 부근에서는 상대적으로 낮은 속도값을 가지기 때문이다. 그리고 스월비가 클수록 피스톤과의 상호작용으로 압축초기에는 작은 난류강도값을 가지나, 압축과정이 진행되면서 상대적으로 큰 값의 난류강도값으로 가짐을 알 수 있다.(피스톤 형상 참조)

이는 스월비가 클수록 압축과정동안에 난류강도의 감소율이 적은 반면에 스월비가 작을수록 압축과정이 진행됨에 따라 난류강도의 감소율이 커기 때문이다. 측정위치가 점화플러그 주위인 점을 감안할 때, 상대적으로 스월비가 큰 경우에는 다른 위치 즉, 실린더보어의 중심으로부터 벗어난 지점 (Fig. 8 참조)에서도 상대적으로 큰 난류강도값을 유지하고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 8은 유점법을 사용하여 실린더내의 스월유동장의 정성적인 실험결과와 LDV를 사용하여 3가지 스월비(스월비=1.3, 2.0, 2.3)에 대하여 x=0mm와 ±20mm지점에서 측정된 실린더내 스월유동속도(그림내 실선) 및 난류강도(그림내 점선)를 나타낸 것이다. 피스톤 표면 근처의 스월유동흐름을 가시화 하는 유점법을 통해 스월비 차이에 따른 유동강도를 정성적으로 비교분석을 해 볼 때, 스월비가 클수록 전체적으로 큰 속도분포가 존재함을 알 수 있다.

이를 바탕으로 LDV를 적용해 흡입 및 압축과정 동안에 어떠한 속도변동이 있었는지를 분석해 보면, 상대적으로 큰 속도분포를 나타낸 스월비가 큰 경우 뿐만아니라 스월비가 작은 경우에 있어서도 각 측정지점에 관계없이 S자형의 속도분포를 잘 나타냄을 알 수 있다. 실린더보어의 중심에서 흡기포트 쪽으로 20mm 편심된 지점에서는 다른 측정지점과

는 달리, 압축중반부터의 생성 유동장이 흡입초기의 유동장과 비슷한 경향을 띠는데, 이는 스월유동의 변곡점이 피스톤의 영향으로 존재함을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서 11리터급 대형 LPG엔진의 연소시스템 안정화를 위해서 다양하게 제작한 흡기포트 및 피스톤 형상에 따른 스월유동해석 실험을 수행한 결과, 아래와 같은 결론은 얻을 수 있었다.

1) 실린더헤드의 흡기포트 최적화를 위해, 레진 및 철틀본드를 이용하여 제작한 여러 흡기포트를 대상으로 정상상태에서 임펄스미터를 이용해 각각의 스월유동특성을 해석(스월비, 유량계수)한 결과, 유량계수의 감소를 최소화하면서 원하는 최적의 스월비를 도출해 낼 수 있었다. 이는 1개의 나선형 흡기포트를 가지고 스월비를 1.3~3.4 범위내로 제어할 수 있음을 나타내며, 이런 결과와 기존 단기통 엔진 실험결과⁷⁾를 바탕으로 K-1E(TCI)엔진내 흡기포트의 스월비는 약 2.0 부근으로 최적화할 수 있었다.

2) 정상상태내 실린더내 스월유동장 해석(LDV 적용)결과, 고스월영역의 흡기포트일수록 측정높이와 상관없이 각각의 측정점에서의 스월유동의 평균 속도는 증가되며, 실린더 중심에 대한 유동의 편심

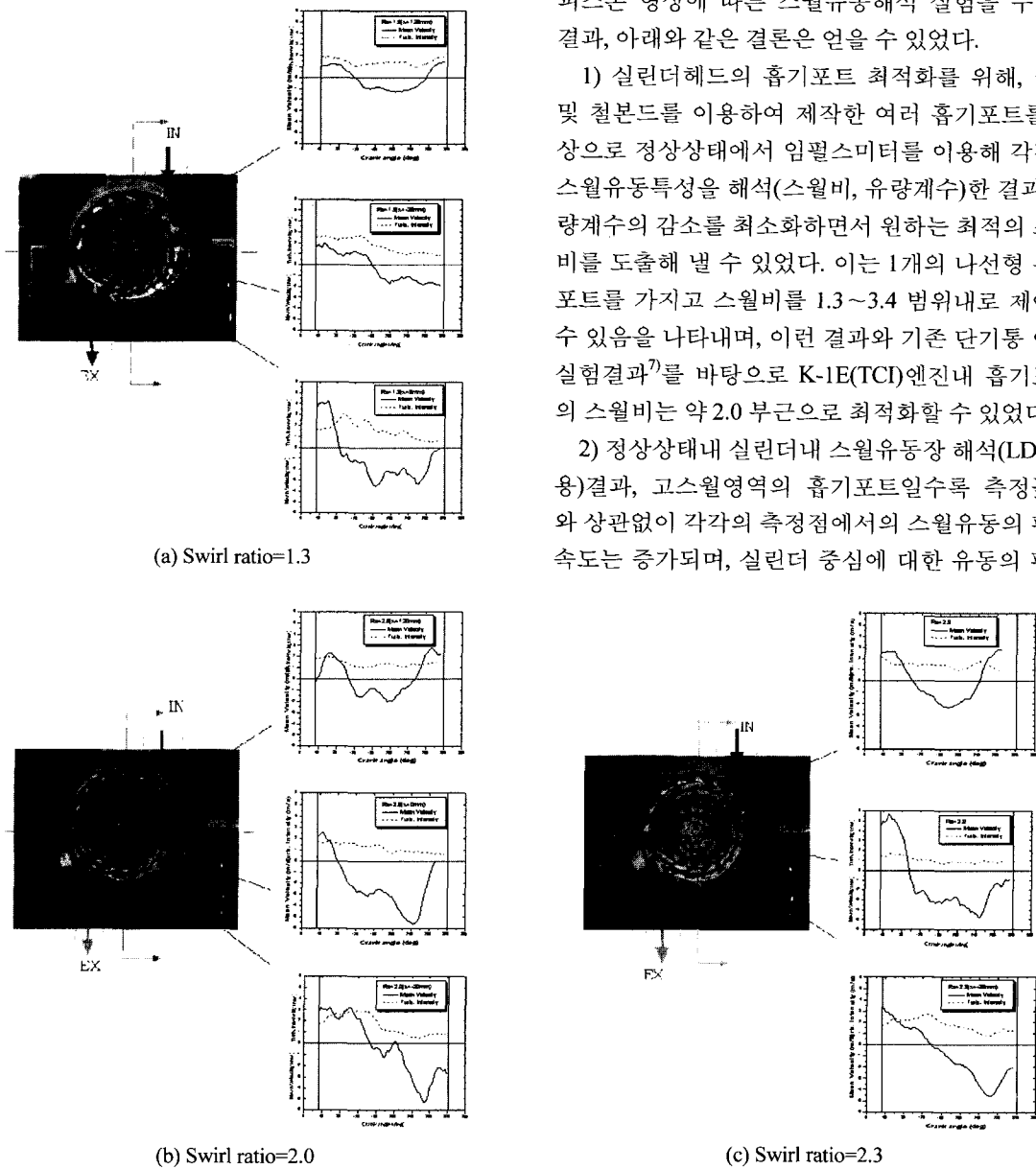


Fig. 8 comparison of swirl flow characteristics with oil spot method

도는 작아짐을 알 수 있었다.

3) 유점법을 통하여 모터링 상태에서의 실린더내의 유동특성을 해석한 결과에서는 스월비가 큰 흡기포트일수록 회전 모멘텀이 크게 나타났으며, 그 스월유동의 중심은 피스톤의 스퀴쉬 유동으로 인해 스월강도에 상관없이 피스톤 중심에 위치하게 됨을 알 수 있었다.

4) LDV적용 단기통 가시화엔진내 모터링상태의 스월유동을 해석한 결과, S자형의 스월유동 분포가 점화플러그 주위에 생성되는데, 스월비가 큰 경우, 상대적으로 강한 선회비를 가지는 스월유동장이 흡입과정 동안에 생기며, 아울러 이에 대한 피스톤 형상의 영향으로 압축과정에서는 저스월형 흡기포트보다 난류강도가 증가하는 특성을 보였다.

후 기

본 연구는 국가지정실연구사업(NRL)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

References

1) K. Y. Kang, R. D. Reitz, "Intake Flow Structure

and Swirl Generation in a Four Valve Heavy Duty Diesel Engine," ASME, Vol.122, 2000.

2) J. K. Martin, S. L. Plee, D. J. Rembiski, "Burn Modes and Prior Cycle Effects on Cyclic Variations in Lean-Burn Spark-Iginition Engine Combustion," SAE 880201, 1988.

3) T. D. Fansler, "Turbulence Production and Relaxation in Bowl-in Piston Engine," SAE 930479, 1993.

4) F. Durst, A. Melling, J. H. Whitelaw, Principle and Practice of Laser Anemometry, Academic Press, 1976.

5) C. R. Stone, N. Ladommatos, "The Measurement and Analysis of Swirl in Steady Flow," SAE 921642, p.69, 1992.

6) 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.

7) B. J. Han, C. U. Kim, K. Y. Kang, C. S. Lee, "The Effect of Intake Swirl Ratios on Combustion Performance in a Heavy-duty LPG Engine," Transactions of KSAE, Vol.9, No.5, 2001.