

Stroke 변화가 Four-Valve SI 엔진 실린더내 유동장에 미치는 영향

Effects of Stroke Changes on the In-Cylinder Flow Field in a Four-Valve SI Engines

유 성 출*
Seoung-Chool Yoo

ABSTRACT

The flow field inside a cylinder of four-valve SI engine was investigated quantitatively using a three-dimensional Laser Doppler Velocimetry system, to determine how stroke changes affect the flow field. The purpose of this work was to develop quantitative methods which correlate in-cylinder flows to engine performance. For this study, the same intake manifold, engine head, cylinder, and the piston were used to examine the flow characteristics in different strokes.

Quantification of the flow field was done by calculating three major parameters which are believed to adequately characterize in cylinder motion. These quantities were TKE, tumble and swirl ratios. The LDV results reveal that flow patterns are similar, the flow velocities scale with piston speed but another parameters such as TKE, and tumble and swirl numbers are not the same for different stroke systems.

주요기술용어 : Turbulence kinetic energy(난류 운동에너지), Three-dimensional laser doppler velocimetry system(3-차원 LDV 장치), Ensemble averaged velocity(앙상블 평균속도), Stroke(행정), Volumetric tumble ratio(체적측정 텀블비), Vortex(와류), Motoring(모터링)

1. 서론

스파크 점화엔진 실린더내의 유동은 연소 과정에 많은 영향을 미치고 있다. 연소는 점화플러그로부터 생성된 스파크 핵과 혼합기에서의 연소반응이 일어나 화염핵이 형성되고 점차 성장하여 초기화염으로 성장하며, 초기화염의 형성이 전체 연소에 지대한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 스파크 점화엔진의 연소 변동을 줄이기 위하여는 초기화염핵 성장기간을 안정적

으로 단축시켜야 하며 이를 위하여는 적절한 난류 유동장이 사용되고 있다. 일반적으로 대규모(large-scale) 회전 유동의 소멸은 점화성에 직접적인 영향을 주는 고 강도의 소규모(small-scale) 난류를 발생시켜 연료와 공기 혼합물의 안정적인 연소율(stable burning rate)을 증가시키는 것으로 알려져 있다. 따라서, 연소능력을 향상시키기 위하여는 흡입과 압축 과정에서 형성되는 유동장과 연소의 상관 관계를 명확히 이해하는 것이 매우 필요하다.

엔진의 성능과 실린더내 유동장과의 관계에 대한 연구는 지난 수 년 전부터 꾸준히 지속되

* 회원, 한라대학교 기계공학부

고 있다. 이러한 연구는 흡기 매니폴드, 흡기 포트 및 피스톤형상의 실린더내 유동현상에 미치는 영향을 분석 함으로서 이루어 지고 있다. Lee et al.^{1,2)}은 3 개의 서로 다른 흡기 포트와 2 종류의 피스톤 형상이 실린더내 유동장에 미치는 영향을 분석하기 위하여 2-차원 LDV 측정과 유동가시화를 실시하였다. 초기의 실린더내 유동 패턴은 흡입 과정에 의하여 형성되며 서로 다른 흡기 포트 형상은 초기 흡입 과정에 형성되는 텀블에 매우 큰 영향을 미친다. 또한, 피스톤 표면에 있는 말발굽 형상(large pop-up)은 텀블의 강도를 증가시키는 것으로 밝혀졌다. Yoo et al.^{3,4)}은 실린더내의 유동장 해석을 위하여 3 차원 LDV 측정을 처음으로 실시하였다. 이들의 실험으로부터 압축 과정중 표면에 말발굽 형상을 갖는 피스톤을 장착한 실린더내의 난류 운동에너지는 표면이 평평한 피스톤을 장착한 경우보다 높은 값을 나타냈다. 일반적으로 실린더내의 난류는 흡입 과정중 들어오는 유동과 압축 말기 과정의 텀블 유동 부서짐으로 발생되며 피스톤 표면 형상은 텀블 조절에 효과적으로 이용될 수 있음을 알 수 있다. Liou⁵⁾는 그의 실험으로부터 상사점에서의 난류 강도는 엔진속도 즉, 피스톤 속도와 직선적으로 비례하여 증가하며 스월이 없는 연소실을 가진 기관의 상사점에서 얻을 수 있는 최대 난류강도는 평균 피스톤속도의 50%와 같다고 결론짓고 있다.

본 연구의 목적은 보다 효율적인 엔진 개발에 필요한 연소 기술의 향상을 위하여 필수적인 실린더 내 유동의 명확한 이해를 위한 분석적 실험 도구의 개발에 있다. 일반적으로 흡입 시스템과 피스톤 형상이 유동장에 영향을 미치는 연구는 많이 진행되고 있다. 최근에는 전열에 의한 손실을 최소화 하기 위하여 연소실의 단위 체적당 표면적비(surface to volume ratio)가 작아서 궁극적으로 연료 경제성을 향상시킬 수 있

는 연소실을 가지고 있는 언더스퀘어(under square)엔진으로 돌아가는 추세이다. 따라서 본 연구에서는 행정(stroke)만 다르고 서로 같은 압축비(9.5:1), 흡기 매니폴드, 엔진헤드, 실린더 및 피스톤을 사용하는 4.6L(오버스퀘어)엔진과 5.4L(언더스퀘어)엔진의 실린더내 유동장의 특성을 3-차원 LDV 시스템을 사용하여 분석 하였으며, 행정 변화가 유동장의 형성 과정과 난류 운동에너지에 미치는 영향을 고찰하였다.

Table 1 Engine specifications

	4.6L Engine	5.4L Engine
Bore	90.2mm	90.2mm
Stroke	90.0mm	105.7mm
Crank radius	45.0mm	52.85mm
Motoring engine speed	600 rpm	600 rpm
Test throat condition	WOT	WOT

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치의 구성

본 연구에는 AVL 싱글 실린더 연구용 엔진 (Type:530)을 사용하였다. 실험장치는 행정의 변화를 가능하게 하고 3000rpm 까지 모터링 할 수 있도록 설계 제작되었으며, 속도 변환 가능한 직류 모터와 AVL 크랭크샤프트를 통하여 연결하였다. 광학적으로 투명한(optically clear) 10mm 두께의 내경 90.2mm 석영(quartz) 실린더가 본 실험을 위하여 제작되었다. 연소실 내에서의 유동은 석영 실린더를 통하여 360° 관찰이 가능하였으며 실린더는 양끝에 Rulon-LD 가스켓을 이용하여 엔진 헤드와 어댑터 플레이트 사이에 설치되었다. 피스톤과 나사의 모든 부분은 레이저 빔에 의한 반사를 줄이기 위하여 모두 검정 색 페인트를 사용하였다. 실제의 엔

진에 사용하는 피스톤 링은 석영 실린더 표면에 쉽게 흠집을 내므로 고열 고압에 잘 견디고 흠집을 내지 않는 특수 피스톤 링을 제작하여 사용하였다. 또한 특수 피스톤 링은 윤활을 필요로 하지 않기 때문에 보다 좋은 광학적 접근(optical access)을 얻을 수 있었다. 실험에 사용된 엔진의 주요사양은 Table 1 과 같다.

2. 2 3-차원 LDV 시스템

Ar-Ion 레이저로부터 나오는 복합 파장(multi-wavelength)빔은 프리즘에 의하여 여러 개의 단 파장(single-wavelength)빔으로 나누어지며 그중 블루 빔(488.0nm)은 x-성분, 그린 빔(514.5nm)은 z-성분, 그리고 바이올렛 빔(476.5nm)은 y-성분 측정을 위하여 사용하였다. 레이저 빔의 측정 체적(measuring volume) 내에 있는 입자에 의하여 산란된 도플러 시그널은 photomultiplier tube (PMT)에 의하여 감지되며 digital burst correlator 에 의하여 처리되었다. Bragg-cell frequency shifter 는 마이너스 성분의 속도 측정을 위하여 설치하였다. 3-차원 LDV 시스템의 개략도는 참고문헌⁴⁾에

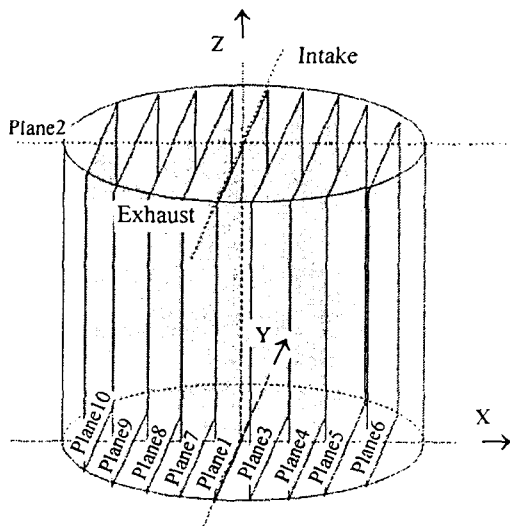


Fig. 1 Cylinder coordinate system displaying cylinder volume with ten measured planes

잘 나타나 있다.

LDV 는 유동장내에 존재하는 입자의 속도를 측정해야 하므로 입자의 선택은 매우 중요하다. 즉, 입자는 유체 유동을 정확하게 따라가야 하며 속도 측정에 사용되는 파장에서 높은 굴절률(large refractive index)을 가져야 한다. 위와 같은 목적을 위하여 산란 입자로 사용되는 propylene glycol 과 물의 혼합물을 분무(atomize)하기 위하여 six-jet atomizer (TSI, Model 9306)를 사용하였으며 분무된 입자 크기의 범위는 0.6 - 1.5 μm 였다.

2. 3 LDV 측정과 데이터 처리

난류 유동의 중요한 특성은 난류 자체의 불규칙성(irregularity)과 무작위 변동(randomness)이다. 이러한 변동은 모든 방향으로 일어나며, 난류 유동장을 정의하는 데는 측정 데이터의 통계적 서술을 이용하고 있다. LDV 측정에 의한 실린더내 난류의 정량적 해석은 통상 앙상블 평균속도(ensemble averaged velocity)와 앙상블 평균난동(ensemble averaged fluctuation)을 사용하고 있다. 앙상블 평균속도는 실린더내의 속도 분포, 스윙 및 텀블을 나타내는데 사용하였으며 앙상블 평균난동은 난류 운동에너지를 나타내는데 사용하였다. 본 연구에서는 앙상블 평균값을 1.8°의 크랭크 각 폭에서 취득한 데이터를 기본으로 구하였으며, 데이터는 각각의 측정 위치에서 수천 사이클에 걸쳐서 취득하였다. 크랭크 각의 폭이 너무 작으면 속도가 측정되는 데이터율이 너무 낮으며 통계적으로 유효한 샘플을 얻기 위해서는 오래 측정하여야 한다. 역으로, 크랭크 각의 폭이 너무 크면 오차가 포함되는데 이것은 크랭크 각의 폭 동안에 측정되는 평균값의 변화 때문에 생긴다. Witze⁶⁾는 동적 현상이 있을 경우 크랭크 각의 폭은 2° 범위가 적절하다고 그의 실험으로부터 밝히고 있다.

Table 2 3-D LDV in-cylinder flow velocity measurement matrix

Engine setup	Speed	No. of Planes	No. of Points
4.6L	600 rpm	10	1,905
5.4L	600 rpm	10	2,232

LDV 측정은 10 개의 서로 다른 각각의 측정면에서 5mm 격자(grid)를 만들어 실시 하였다. 직교 좌표계와 측정면은 Fig. 1 에 표시되어 있으며 좌표계의 중심은 피스톤이 하사점에 있을 때의 피스톤 표면 중심이다. 측정면 1 과 측정면 3 부터 측정면 10 까지는 x-축에 수직인 측정면에 해당하며 흡기 밸브 사이를 통과하는 센터(center)면에 평행이고 각각 10mm 간격으로 떨어져 있다. 측정면 2 는 y-축에 수직인 측정면에 해당하며 실린더 중심에 위치하고 다른 9 개의 측정면과 서로 수직이다. 실린더내 전체 유동장의 특성을 효과적으로 분석하기 위하여 4.6L 엔진에서는 1,905 곳에서, 5.4L 엔진에서는 2,232 곳에서 LDV 측정을 하였다. 본 실험에 사용한 엔진들의 측정 매트릭스(matrix)는 Table 2 에 나타내었다. 각 측정위치의 좌표와 데이터는 크랭크 각에 따라 처리 하였으며 이러한 자료는 실린더 축에 수직면, 수평면 그리고 전체 실린더 체적에서 정량적인 값을 계산하는데 사용하였다. 실린더내 전체 측정면에서 구한 텀블비를 나타낼 때 x-축과 y-축에 수직인 측정면에서는 체적측정 텀블비(T_x, T_y)라 하였으며, z-축에 수직인 측정면에서는 체적측정 스웰비(T_z)라 하였다. 이렇게 계산된 값은 어느 특정한 단면이 아닌 전체 실린더 체적 내에서의 유동 패턴, 텀블, 그리고 스웰의 발달과정을 연구하는데 매우 귀중한 자료를 제공하며 특히, 난류 운동에너지 변화와 크랭크 각의 상관 관계를 밝히는데 유용하게 이용되고 있다. 텀블비를 계산하는 데는 크랭크 각에 해당하는 실린더 체

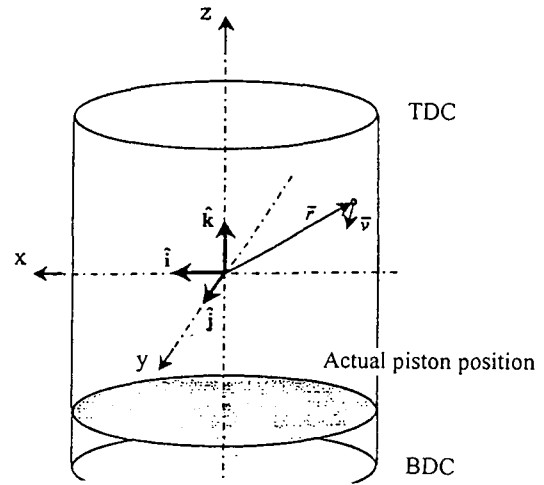


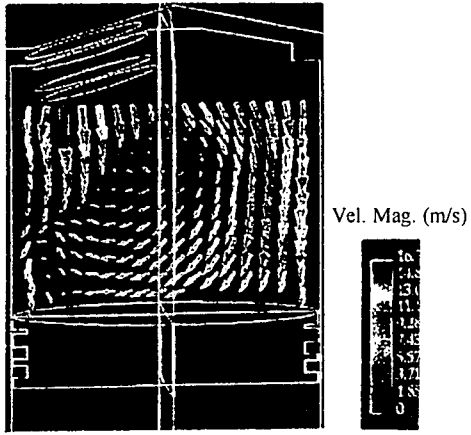
Fig. 2 Cylinder coordinate system with moving origin about the instantaneous center of the volume

적의 순간 중심(moving origin)을 Fig. 2 와 같이 설정하여 사용하였으며 데이터 처리 과정과 난류 운동에너지 및 텀블비의 계산 방법은 참고문헌^{7,8)}에 잘 나타나 있다.

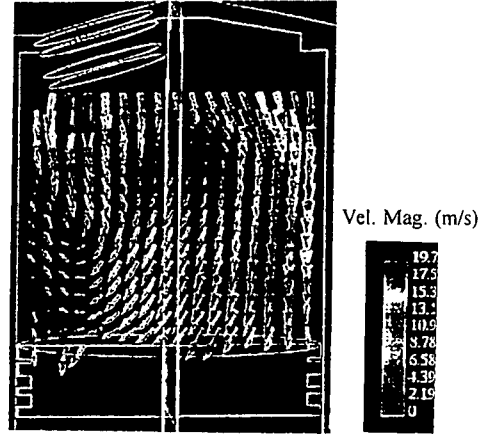
3. 실험결과 및 고찰

3.1 실린더내 속도분포

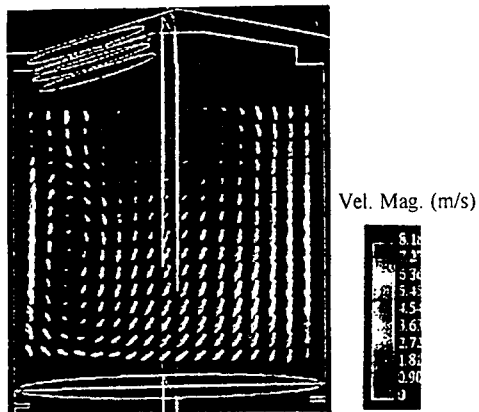
Fig. 3 과 4 는 4.6L 와 5.4L 엔진이 600rpm 으로 모터링 될 때 측정면 1 에서의 평균 유동 패턴(mean flow pattern)을 나타내며, 측정은 흡입과 압축 과정 동안 실시하였다. 실린더 벽과 가까운 부분에서는 석영 실린더 곡면의 영향으로 측정이 불가능하였다. 그림에서 점은 측정 위치를 나타내며 선은 속도의 크기와 방향을 나타낸다. 실린더 벽을 따라 들어오는 제트(jet)유동은 피스톤 표면에서 전향되며, 전향된 유동은 피스톤 표면 위를 따라 움직이다가 서로 부딪치며 맞은편 실린더 벽을 따라 다시 올라간다. 이러한 과정은 그림에 나타나듯이 좌측 실린더 벽 쪽 피스톤 위에 하나의 와류(vortex)를 만들었다. 생성된 와류는 끊임없이 유체와 더불어 이동(convect)하며 피스톤 위에 있는 와류는 계속 관찰할 수 있었다.



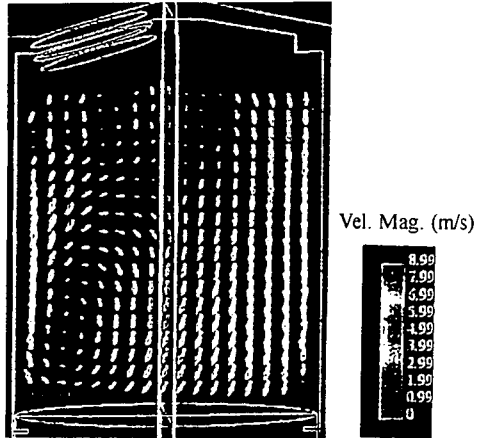
(a) 4.6L at 600 rpm at 119° CA



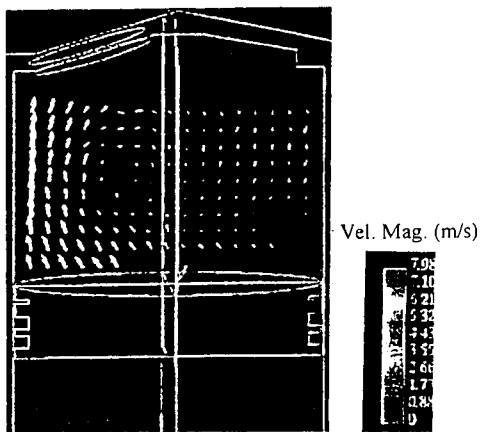
(a) 5.4L at 600 rpm at 119° CA



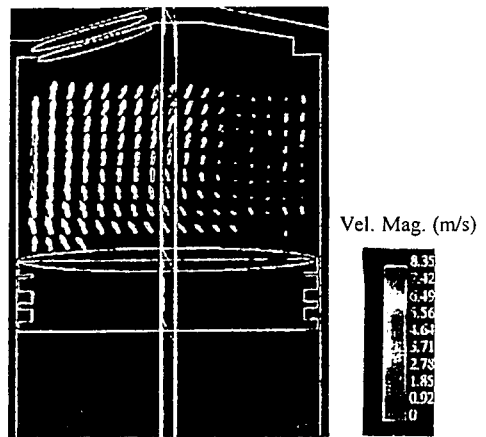
(b) 4.6L at 600 rpm at 178° CA



(b) 5.4L at 600 rpm at 178° CA



(c) 4.6L at 600 rpm at 259° CA



(c) 5.4L at 600 rpm at 259° CA

Fig. 3 Mean velocities in the vertical plane 1 for the 4.6L setup

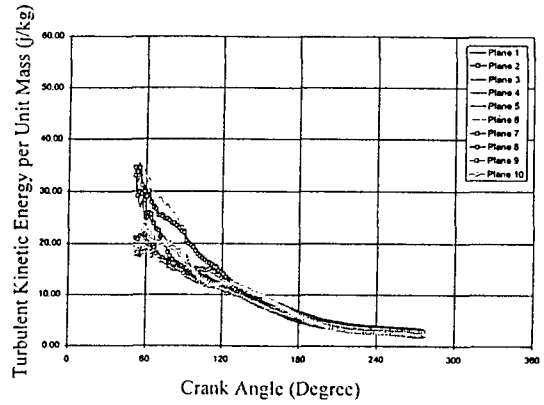
Fig. 4 Mean velocities in the vertical plane 1 for the 5.4L setup

흡입 과정은 흡기밸브의 닫힘으로 종료되며 계속 이어지는 압축 과정의 초기 조건을 형성한다. 압축 과정 동안의 유동장은 피스톤 표면 위에 하나의 와류 유동으로 특성화 된다. 와류 유동은 압축 과정 동안에 피스톤 표면 위의 좌측에서 우측으로 이동하는 특징을 보였다. 5.4L 엔진의 경우, 와류는 우측 실린더 벽에 더욱 가까이 근접하고 세력이 강한 특성을 보였으며 피스톤이 상사점에 가까워 질수록 왼쪽 실린더 벽면을 향한 바깥쪽 반지름 방향으로(radial outward)의 유동 패턴을 만들었다.

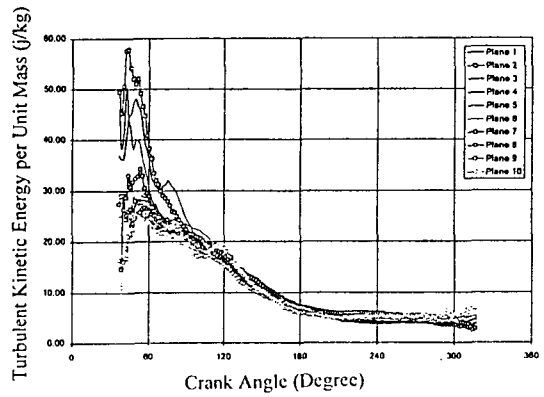
실험 결과로부터 행정 변화가 실린더내 대규모 회전 유동 패턴에 미치는 영향은 속도의 크기만 제외하고 전반적으로 동일한 양상을 가짐을 알 수 있었다. 이러한 유동 패턴은 동일한 실린더헤드, 밸브 형상 및 피스톤의 영향으로 생각되며 실린더내 대규모 회전 유동의 패턴은 흡기계 및 피스톤 형상과 매우 밀접한 관계가 있다는 사실을 알 수 있다. 즉, 실린더내 난류는 소규모 난류로부터 대규모 난류에 걸친 특성을 가지고 있으나 대규모 난류는 무작위 이지만 실린더헤드, 피스톤 및 연소실 등의 형상으로 제어되는 방향성을 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 흡입 과정 동안 측정면 1 에서 발생한 가장 큰 크기의 와류는 실린더 내경의 반정도 크기였으며, 5.4L 엔진에서 더욱 뚜렷한 와류 유동을 관찰할 수 있었다.

3.2 난류 운동에너지

Fig. 5 는 흡입과 압축 과정 동안에 일어나는 난류 운동에너지와 크랭크 각과의 관계를 나타낸다. 난류 운동에너지는 10 개의 서로 다른 측정면에서 각각 계산하였다. 초기 흡입 과정에서 난류 운동에너지는 흡기 밸브를 통하여 들어오는 제트에 의해 생성된다. 이러한 유동의 특성 때문에 초기 난류 운동에너지는 모든 측정면에



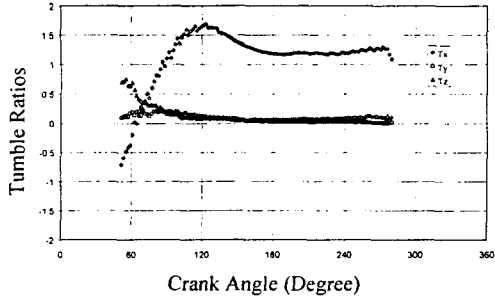
(a) 4.6L setup



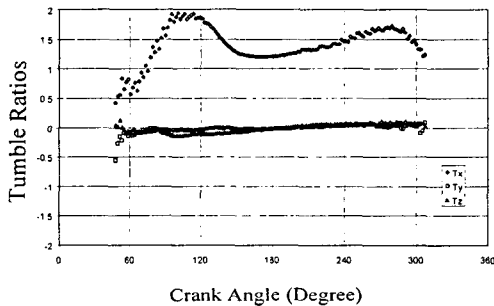
(b) 5.4L setup

Fig. 5 Turbulent kinetic energy per unit mass for the ten measured planes, measured at 600 rpm engine speed

서 대체로 높은 값을 가지며, 행정이 긴 5.4L 엔진이 4.6L 엔진에 비하여 높은 에너지 값을 갖는다. 4.6L 엔진의 경우에는 높은 값을 갖는 난류 운동에너지(최대 약 35 J/kg)가 초기 흡입 과정에서 측정면 1, 2, 3, 5, 7 에서 관찰되며, 5.4L 엔진의 경우에는(최대 약 55 J/kg) 측정면 1, 3, 7 에서 관찰된다. 즉, 높은 값의 난류 운동에너지는 4.6L 엔진의 측정면 5 를 제외하고 일반적으로 실린더 중심 부분과 흡기 밸브 밑 부분을 통과하는 측정면에서 관찰 되었으며, 그의 세력은 흡기 밸브쪽 실린더 벽 방향으로 확대 되었다. 그 후 높은 난류 운동에너지를 가지는



(a) 4.6L setup

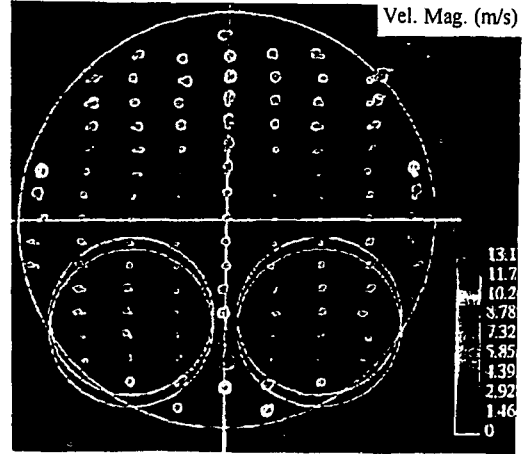


(b) 5.4L setup

Fig. 6 Volumetric tumble ratios around the moving origin, measured at 600 rpm engine speed

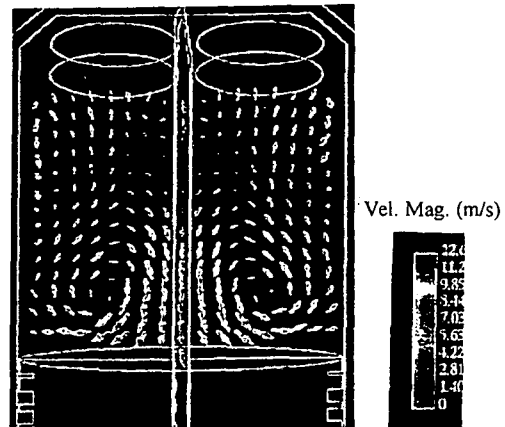
이후에는 0 에 근접한 값을 나타낸다. 이러한 현상은 일반적으로 4 개 밸브(four-valve) 실린더헤드를 장착한 엔진에서 나타나는 두개의 유입 유동이 상호 작용으로 각각 y-축에 수직인 측정면과 z-축에 수직인 측정면에서 대칭인 유동장 패턴을 형성하기 때문인 것으로 사료되며 (Fig.7a, b), 하나의 파라미터(single parameter)는 여러 가지 다른 영향의 종합이므로 유동장의 특성 분석을 위하여 하나의 파라미터에 의존하는 것은 적절한 방법이 아닌 것으로 판단된다.

하사점 부근에서는 양행정 엔진 모두 비슷한 T_x 값을 나타내지만 압축 과정에서의 체적측정 텀블비는 흡입 과정에서와 마찬가지로 매우 다른 양상을 보이고 있다. 이러한 사실은 흡입과 압축 과정에서 나타나는 유동장의 특징을 하사점에서 측정한 값으로는 정확히 예측할 수 없



(4.6L at 600 rpm at 141° CA)

Fig. 7 (a) Mean velocities in the top slice



(4.6L at 600 rpm at 141° CA)

Fig. 7 (b) Mean velocities in the vertical plane 2

다는 것을 잘 나타내고 있다. 따라서 엔진의 행정 설계는 정상 유동상태(steady state) 보다는 과도상태(transient state)에서 분석되어야 함을 제안하고 있다.

엔진의 작동은 스윙 및 텀블 등의 거시적 회전 유동 외에 유동내의 강한 난류에 따라 달라진다. 난류는 혼합, 열전달 및 연소를 촉진시킨다. 따라서, 행정 변화를 통하여 흡입 과정 동안에 형성되는 회전 유동을 압축 말기의 난류 유동장과 효과적으로 연계 시키는 것은 연소실의 형상 설계와 더불어 매우 중요하게 생각된다.

4. 결론

엔진의 행정 변화가 실린더내 유동장에 미치는 영향에 대하여 실험적 해석 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 5.4L 엔진의 경우 x-축에 수직인 측정면에서의 난류 운동에너지는 압축 말기에 실린더 벽에 가까운 곳에서 증가하는 것으로 나타났다.

2) T_y 및 T_z 는 T_x 에 비하여 작은 값을 나타내는데 이것은 측정면에서의 유동장이 서로 대칭이기 때문인 것으로 생각된다.

3) 압축 행정 말기에서 실린더내 난류 운동에너지는 장행정 엔진이 단행정 엔진에 비하여 높은 값을 갖는 것을 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

4) T_x 가 최대 값을 갖는 영역은 측정면 1 에서 와류가 형성되는 시기 및 난류 운동에너지의 감소가 주춤거릴 때의 크랭크 각과 거의 일치하는 것으로 나타났다.

5) 5.4L 엔진의 경우 초기 흡입 과정 중에 T_x 값의 변동이 4.6L 엔진 보다 더욱 심한 것은 유체 유동장의 강도가 강하기 때문인 것으로 생각되며 결과적으로 높은 값의 난류 운동에너지를 나타낸다. 이러한 현상은 크랭크 각 230° 부근 이후에도 잘 나타나있다.

6) 상사점 부근의 난류를 적절히 조절하는데 있어서 행정은 흡기계와 연소실 및 피스톤의 형상 설계와 더불어 중요하게 취급 되어야 한다는 것을 확인 할 수 있었다.

참 고 문 헌

1) K. Lee, S.-C. Yoo, T. Stuecken, D. McCarrick and H. Schock, "An Experimental Study of In-Cylinder Air Flow in a 3.5L Four Valve SI Engine by High Speed Flow Visualization and Two-Components LDV Measurement," SAE

930478, 1993.

2) 유성출, "고속 유동 가시화와 LDV 측정을 이용한 SI 엔진 실린더내 유동장에 관한 실험적 해석," 한국 자동차공학회 논문집, 제 3 권 제 4 호, pp.59-67, 1995.

3) S.-C. Yoo, K. Lee, M. Novak and H. Schock, "3-D LDV Measurement of In-Cylinder Air Flow in a 3.5L Four-Valve SI Engine," SAE 95648, 1995.

4) 유성출, "Four-Valve SI 엔진 실린더내 유동장에 관한 실험적 해석(Angular Momentum 효과의 집중 분석)," 한국 자동차공학회 논문집, 제 3 권 제 4 호, pp.88-96, 1995.

5) T.-M. Liou, M. Hall, D. A. Santavicca and F. V. Bracco, "Laser Doppler Velocimetry Measurements in Valved and Ported Engines," SAE 840375, 1984.

6) P. O. Witz, "A Critical Comparison of Hot-Wire Anemometry and Laser Doppler Velocimetry for IC Engine Applications," SAE 800132, 1980.

7) K. Jaffri, H. Hascher, M. Novak, K. Lee and H. Schock, "Tumble and Swirl Quantification within a Motored Four-Valve SI Engine Cylinder Based on 3-D LDV Measurements," SAE 970792, 1997.

8) H. Hascher, K. Jaffri, M. Novak, K. Lee and H. Schock, "An Evaluation of Turbulent Kinetic Energy for the In-Cylinder Flow of a Four-Valve 3.5L SI Engine Using 3-D LDV Measurements," SAE 970973, 1997.

9) B. J. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw-Hill Publishing Company, 1988.