Stroke 변화가 Four-Valve SI 기관 실린더내 난류 운동에너지에 미치는 영향

유성출[†]

Effects of Stroke Change on Turbulent Kinetic Energy for the In-Cylinder Flow of a Four-Valve SI Engine

S. C. Yoo

Abstract. The effects of stroke change on turbulent kinetic energy for the in-cylinder flow of a four-valve SI engine were studied. For this study, the same intake manifold, head, cylinder, and the piston were used to examine turbulence characteristics in two different strokes. In-cylinder flow measurements were conducted using three dimensional LDV system. The measurement method, which simultaneously collects 3-D velocity data, allowed a evaluation of turbulent kinetic energy inside a cylinder. High levels of turbulent kinetic energy were found in regions of high shear flow, attributed to the collisions of intake flows. These specific results support the more general conclusion that the inlet conditions play the dominant role in the generation of the turbulence fields during the intake stroke. However, in the absence of two counter rotating vortices, this intake generated turbulent kinetic energy continues to decrease but at a much faster rate.

Key Words: Turbulent Kinetic Energy(난류 운동에너지), LDV(레이저 유속계), Stroke(행정), Motoring(모터링), Vortex(와류), Ensemble Averaged Fluctuation(앙상블 평균 난동)

1. 서 론

기관의 실린더 내부에 들어간 연료 가운데 일부는 입경이 크고 또한 다른 일부는 벽류(wall flow)로 되어서 연소에 참여하지 못하는 부분이 있다. 실린더내 유동이 연료의 기화를 촉진 시키고, 공기·연료의 혼합을 증진 시키며, 연소속도와 연료를 허실 없이 연소시켜서 출력으로 변환시키는 연소효율을 증가시키도록 하는 것은 중요하다. 연소는 점화플러그로부터 생성된 스파크 핵과 혼합기와의 연소반응이 일어나 화염 핵이 형성되고 점차 성장하여 초기화염으로 성장하며, 초기화염의 형성이 전체 연소에 지대한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 기관의 연소변동을 줄이기 위해서는 초기화염 핵 성장기간을 안정적으로 단축시켜야 하며, 따라서 점화가 일어나는 상사점 부근의 강한 난류는 연소에 매우 바람직하므로 실린더내 난류강도의 발달과정에 대한 분석이 중요한 연구 대상으로 취급되고 있다.

일반적으로 기관의 회전속도가 높아질수록 흡기유량은 증가하며 대규모(large scale) 회전유동도 증가한다. 대규모 회전유동의 일부는 흡입과정 말기로 접근할 때 부서지고, 흡입과정 끝까지 잔류하는 회전유동은 초기의 압축과정까지 지속되며, 그 후의 유동구조는 압축과정에 의하여 변화한다⁽¹⁾. 대규모 회전유동의 소멸은 점화성에 직접적인 영향을 주는 고 강도의 소규모(small scale) 난류를 발생시켜 연료 기화율, 연료 증기와 공기의 혼합율 및 연소율을 증가시키는 것으로 알려져 있다⁽²⁾. 흡입과 압축행정 동안에 형성되는 거시적 질량운동인 스월(swirl)과 텀블(tumble) 등의 회전유동은 4-밸브 기관의 특성상 측정면에 따라 회전방향이 서로 다른 한 쌍의 유동현상(two symmetry counter flow patterns)을 나타내기도 한다. 따라서 서로 다른 유동 패턴이 동일한 값의 각 운동량을 가질 수 있으며 회전중심의 결정에 의하여 각 운동량 값은 변화될 수 있다⁽³⁾. 연소지속기간(burn duration)과 깊은 관계가 있는 복잡한 실린더 내부 유동장의 특성을 하나의 대규모 회전유동 파라미터로 표현하는 것은 부적절하다⁽⁴⁾.

[†]한라대학교 기계자동차공학부
E-mail : scyoo@halla.ac.kr

그러므로 점화성에 직접적인 영향을 주는 난류강도로 나타내는 것이 훨씬 효과적이라 판단된다.

최근에는 열전달에 의한 손실을 최소화하기 위하여 연소실의 단위 체적당 표면적비가 작아서 궁극적으로 연료 경제성을 향상시킬 수 있는 장행정 기관으로 돌아가는 추세이다. 본 연구에서는 행정만 다르고 서로 같은 흡기메니폴드, 헤드 및 피스톤을 사용하는 단행정 기관과 장행정 기관의 실린더 내부 난류강도를 크랭크 회전각에 따라 분석하였으며, 행정 변화가 난류 운동에너지에 미치는 영향을 고찰하였다. 본 연구를 통해 실린더 내부 난류 운동에너지에 대한 실험적인 자료를 시각적 관점에서 보여주고, 정량적인 면에서 유동특성을 이해하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

본 연구와 관련된 기존연구를 살펴보면, Lee등⁽⁵⁾이 2-차원 LDV 시스템을 사용하여 실린더 내부 다수의 측정면에서 행한 난류 운동에너지 연구가 있다. 3-차원 LDV 측정 자료를 사용한 연구는 Yoo등⁽⁶⁾의 실린더 내부 중심 측정면에서 피스톤의 표면형상 변화가 난류 운동에너지에 미치는 영향 분석과, 흡기포트와 피스톤의 표면형상 변화가 있는 경우의 난류 운동에너지 특성에 대한 연구가 있다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치의 구성

본 연구에는 AVL 싱글 실린더 연구용 기관(Type: 530)을 사용하였다. 실험 장치는 행정의 변화를 가능하게 하고 3000 rpm까지 모터링 할 수 있도록 설계·제작하였으며, 속도변환 가능한 직류 모터와 AVL 크랭크 샤프트를 통하여 연결하였다. 광학적으로 투명한(optically clear) 10 mm두께의 내경 90.2 mm 석영(quartz) 실린더를 본 실험을 위하여 제작하였다. 실린더 내부의 유동은 석영 실린더를 통하여 360° 관찰이 가능하였으며, 실린더는 양끝에 Rulon-LD 개스킷을 이용하

여 기관 헤드와 어댑터 플레이트 사이에 설치하였다. 실체의 기관에 사용하는 피스톤링은 석영 실린더 표면에 쉽게 흠집을 내므로 고열·고압에 잘 견디고 흠집을 내지 않는 특수 피스톤링을 제작하여 사용하였다. 또한 특수 피스톤링은 윤활을 필요로 하지 않기 때문에 보다 좋은 광학적 접근(optical access)을 얻을 수 있었다. 실험에 사용된 기관의 주요사양은 Table 1과 같다.

2.2 3-차원 LDV 시스템

Ar-Ion 레이저 빔은 프리즘에 의하여 여러 개의 단파장(single-wavelength) 빔으로 나누어지며 그중 블루빔(488.0 nm)은 x-성분, 그린 빔(514.5 nm)은 z-성분, 그리고 바이올렛 빔(476.5 nm)은 y-성분의 속도를 측정하기 위하여 사용하였다. 실린더내 각각의 측정 위치에서 블루 빔과 그린 빔의 측정체적은 전반적으로 잘 일치하였으며 바이올렛 빔은 미세조정을 하여 일치시켰다. 레이저 빔의 측정체적에 있는 입자에 의하여 산란된 도플러 신호는 광전자증배관(PMT)에 의하여 감지되며 digital burst correlator에 의하여 처리되었다. Bragg-cell frequency shifter는 마이너스 성분의 속도측정을 위하여 설치하였다. 3-차원 LDV 시스템의 개략도는 Fig. 1에 나타나있다.

LDV는 유동장내에 존재하는 입자의 속도를 측정해야 하므로 입자의 선택은 매우 중요하다. 즉, 입자는 유체유동을 정확하게 따라가야 하며 속도측정에 사용되는 파장에서 높은 굴절률(large refractive index)을 가져야 한다. 위와 같은 목적을 위하여 분무(atomize)된 propylene glycol과 물의 혼합물을 산란 입자로 사용하였다. 혼합물의 분무는 six-jet atomizer(TSI Model: 9306)를 사용하였으며 분무된 입자 크기의 범위는 0.6-1.5 μm 이었다.

Fig. 1. LDV test stand setup.

Table 1. Engine specifications

Configuration	Short stroke	Long stroke
Bore	90.2 mm	90.2 mm
Stroke	90.0 mm	105.7 mm
Crank radius	45.0 mm	52.85 mm
Motoring speed	600 rpm	600 rpm
Throat condition	WOT	WOT

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 실린더 내부 난류의 정량적 해석은 통상 앙상블 평균 속도(ensemble averaged velocity)와 앙상블 평균 난동(ensemble averaged fluctuation)을 사용 하고 있다. 앙상블 평균 난동은 난류 운동 에너지를 나타내는데 사용하였다. 난류 운동에너지($\overline{q^2}$)는 실린더 내의 공기 온도가 행정이 진행되는 동안 주위 공기 온도와 동일하여 공기 밀도가 일정하다는 가정 하에 식과 같이 계산하였다⁽⁷⁾.

$$\overline{q^2} = \frac{1}{2}[\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}]$$

여기서, $\overline{u^2}$, $\overline{v^2}$, $\overline{w^2}$ 는 각각 x, y, z 방향의 난동 속도를 제공한 값의 평균이다.

본 연구에서는 앙상블 평균값을 1.8°의 크랭크 각 폭에서 취득한 데이터를 기본으로 구하였으며, 데이터는 각각의 측정 위치에서 수천 사이클에 걸쳐서 취득하였다. 크랭크 회전각의 폭이 너무 작으면 속도가 측정되는 데이터율이 너무 낮으며 통계적으로 유효한 샘플을 얻기 위해서는 오래 측정하여야 한다. 역으로, 크랭크 회전각의 폭이 너무 크면 오차가 포함되는데 이것은 크랭크 회전각의 폭 동안에 측정되는 평균값의 변화 때문에 생긴다. Witze⁽⁸⁾는 동적현상이 있을 경우

Fig. 2. Measurement planes and coordinate system for both engine setups.

크랭크 회전각의 폭은 2° 범위가 적절하다고 그의 실험으로부터 밝히고 있다.

LDV 측정은 10개의 서로 다른 각각의 측정면에서 5 mm 격자(grid)를 만들어 3-축 레이저 빔 이송 테이블(Fig. 1)을 이용하여 실시하였다. 본 연구는 동일한 조건에서 행정 변화가 난류 운동에너지에 미치는 영향을 비교·분석하는 것으로 관측창을 통과할 때 발생하는 레이저 빔의 굴절은 고려하지 않았다. 직교 좌표계와 측정면은 Fig. 2에 표시되어 있으며 좌표계의 중심은 피스톤이 하사점에 있을 때의 피스톤 표면 중심이다. 측정면1과 측정면3 부터 측정면10까지는 x-축에 수직인 측정면에 해당하며 흡기밸브 사이를 통과하는 중심면에 평행이고 각각 10 mm 간격으로 떨어져 있다. 측정면2는 y-축에 수직인 측정면에 해당하며 실린더 중심에 위치하고 다른 9개의 측정면과 서로 수직이다.

실린더내 전체 유동장의 특성을 효과적으로 분석하기 위하여 단행정 기관에서는 1,905곳에서, 장행정 기

(a) Short stroke setup

(b) Long stroke setup

Fig. 3. Turbulent kinetic energy for the two measured planes, measured at 600 rpm.

관에서는 2,232곳에서 LDV측정을 하였으며 데이터율(data rate)은 50 kHz 였다. 각 측정위치의 좌표와 데이터는 크랭크 회전각에 따라 처리 하였으며 이러한 자료는 각 측정면과 전체 실린더 체적에서 정량적인 값을 계산하는데 사용하였다. 이렇게 계산된 값은 유동패턴 발달과정을 연구하는데 매우 귀중한 자료를 제공하며 특히, 난류 운동에너지 변화와 크랭크 회전각의 상관관계를 밝히는데 매우 유용하게 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

기관의 피스톤 속도가 커지면서 실린더 체적으로 유입되는 유량은 증가하며, 이에 상응하는 대규모 회전유동과 난류도 증가한다. 이러한 증가는 연료 기화율, 공기·연료 혼합을 및 연소율을 향상시킨다. 따라서 난류 운동에너지의 생성 및 소멸에 대한 메커니즘을 정확하게 이해하는 것은 매우 중요하다. 난류 운동에너지는 10개의 서로 다른 측정면에서 각각 계산하여 비교하였다. 측정면1과 측정면3 부터 측정면10 까지 x-축에 수직인 측정면의 난류 운동에너지는 실린더 벽에 가까워질수록 에너지 강도는 작아지나 서로 비슷한 유동패턴을 보였지만, y-축에 수직인 측정면2는 전혀 다른 특징을 나타낸다. Fig. 3은 흡입과 압축과정 동안에 일어나는 측정면1과 측정면2의 난류 운동에너지의 변화를 크랭크 회전각에 따라 나타낸다. 난류 운동에너지는 모든 측정면에서 장행정 기관이 단행정 기관에 비하여 높은 값을 갖지만 동일한 흡기계의 사용으로 같은 측정면에서 서로 비슷한 유동장 특징을 보였다. 난류강도는 피스톤 속도에 강하게 의존하며 난류를 강화하기 위해서는 장행정 기관이 유리함을 보여준다.

초기의 흡입과정에서 난류 운동에너지는 흡기밸브를 통하여 유입되는 유동에 의해 생성된다. 난류 운동에너지는 크랭크 회전각 약 100~130° 부근에서 최대값에 이른다. 특히 장행정 기관의 값이 단행정 기관에 비하여 약 10° 빠른 크랭크 회전각에서 최대값에 이른다. 실린더 체적 중심에 위치한 측정면1과 2를 비교하면 두 기관 모두 측정면1에서 크랭크 회전각 약 130° 까지 높은 값을 보이다가 그 이후는 측정면2에서 높은 값을 압축과정 말기까지 지속적으로 보이며, 에너지 감소율도 측정면2에서 낮게 나타난다. 높은 값의 난류 운동에너지는 흡기밸브를 통하여 유입되는 두 개의 유동이 서로 부딪치는 영역에서 관찰되었다. 이 영역은

흡기밸브 사이에 위치하며, 흡기밸브 쪽 실린더 벽까지 확장하였다. 측정면1에서 높은 값의 난류 운동에너지 영역은 크랭크 회전각 150° 부근에서 강한 와류튜브(strong vortex tubes)가 나타날 때 까지 피스톤과 같이 이동하였다. 그 후, 높은 난류 운동에너지는 두 곳의 다른 위치에 있는 와류 튜브를 따라 형성됐다. 와류는 실린더 벽면을 따라 발달하는 두 개의 주유동 충돌로부터 생성되었다. 두 개의 주유동은 긴 쪽 유동과 짧은 쪽 유동이다. 긴 쪽 유동은 흡기밸브를 통하여 유입된 유동이 배기밸브 쪽 경계면을 따라가며, 짧은 쪽 유동은 흡기밸브 쪽 실린더 벽을 따라 밑으로 향한다. 두 유동은 흡기밸브 쪽 피스톤 위치의 중간부분에서 서로 만난다. 두 유동의 충돌은 두 개의 와류 튜브를 만들며, 하나는 흡기밸브 쪽 피스톤 위치의 중간 부근에 형성되며, 다른 하나는 실린더턱 밑 중심선 가까이에서 형성된다.

측정면2의 유동장 특징은 서로 대칭인 흡입 제트와 실린더벽 그리고 피스톤 표면의 상호작용으로 대칭이고 회전방향이 반대인 한 쌍의 와류를 만들며, 회전유동 패턴의 중심은 피스톤과 함께 계속 움직여 하사점 부근에서는 피스톤 표면위 피스톤 표면과 기관 헤드 사이 체적의 1/3 공간에서 한 쌍의 회전유동 패턴을 형성한다. 흡입과정 후반부와 압축과정 전체에 걸쳐 측정면2에서 관찰되는 높은 값의 난류 운동에너지는 측정면1에 비하여 더욱 오래 지속되는 피스톤 표면위 회전유동 패턴과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

Fig. 4-Fig. 7은 3-차원 등고선 표현방법(3-D contour

Fig. 4. Isosurfaces of turbulent kinetic energy for the short stroke setup at 119° crank angle.

Fig. 5. Isosurfaces of turbulent kinetic energy for the short stroke setup at 281° crank angle.

Fig. 6. Isosurfaces of turbulent kinetic energy for the long stroke setup at 119° crank angle.

map)을 이용하여 실린더내 난류 운동에너지 분포를 크랭크 회전각에 따라 표현한 것이다. 각 그림에서 실선은 실린더와 피스톤 그리고 2개의 흡기밸브를 나타낸다. 두 기관의 난류 운동에너지 분포는 서로 비슷한 특징을 보이고 있다. 크랭크 회전각 약 120° 부근에서 높은 값의 에너지 분포는 측정면1에 평행한 실린더 체적 중심의 밸브 밑 부분에 주로 분포하며, 흡기밸브 쪽 실린더 벽 방향으로 확대하였다(Fig. 4, Fig. 6). 그 후 높은 에너지 영역은 피스톤과 함께 이동하였다. 흡입과정 말기에는 도넛 형상의 등가 등고선이 측정면2에 평행하게 나타나며, 높은 에너지 값은 피스톤 표면 위 실린더 체적 1/3 지점에 위치한다. 하사점에서는 피스톤 표면 가까이에 말발굽 모양의 난류 운동에너지 등가 등고선 구조가 관찰되었다. 흡입과정에서 주목할 점은 높은 에너지 값이 측정면1에 평행한 영역에서 측정면2에 평행한 영역으로 바뀌는 것이다. 초기 압축과정은 흡기밸브가 아직 열려있기 때문에 말발굽 모양의 높은 난류 운동에너지 끝부분이 흡기밸브를 향하여 이동하였으며 흡기밸브를 통하여 실린더로 부터 역류가 발생하였다.

흡기밸브가 닫힌 후 높은 난류 운동에너지 구조의 중심은 실린더 중심을 향하여 이동하였으며 말발굽 모양의 양 끝단은 흡기밸브 밑 부분에 위치해 있다. 압축 행정 말기에 난류 운동에너지는 피스톤에 밀려서 연소실 내부에 분산되었다. 이 단계에서 흡기밸브 쪽 유동은 배기밸브 쪽보다 더 강했으며 2개의 높은 값의 난류 운동에너지 등가면이 흡기밸브 쪽에서 관찰되었다. 또한 장행정 기관에서 더욱 고른 에너지 분포를 관찰

Fig. 7. Isosurfaces of turbulent kinetic energy for the long stroke setup at 300° crank angle.

할 수 있었다(Fig. 5, Fig. 7). 이러한 관찰은 Fig. 3에서 보여준 측정면2의 높은 에너지 값과 일치한다.

4. 결 론

기관의 행정 변화에 따른 실린더 내부 난류 운동에너지 특성을 실험적 해석 연구를 수행하여 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 동일한 흡기계와 피스톤을 사용하는 기관의 유동장 특징은 대체로 비슷하며 장행정 기관에서 연소기간에 영향을 미치는 인자중의 하나인 난류강도가 모든 크랭크 회전각에서 높게 형성되는 것을 관찰할 수 있

었다.

2) 기관의 흡기과정은 실린더 내부 유동의 중요한 면을 결정한다. 측정면1과 2의 비교에서 높은 값의 난류 운동에너지는 흡기초기 측정면1에 형성되다가 크랭크 회전각 약 130° 이후부터 압축말기 까지 측정면2에 형성되는 것을 관찰할 수 있었다. 측정면1에서 제트 유동의 박리는 실린더 벽과 움직이는 피스톤과의 상호작용으로 대규모 회전유동 패턴을 밸브 밑 실린더 벽과 밸브사이 코너에 만들면서 높은 에너지 값을 가지며, 형성된 회전유동은 시간이 지남에 따라 불안정 해지고 하사점 전에 사라졌다. 측정면2의 높은 에너지 값은 측정면1에 형성된 와류보다 더욱 오랫동안 지속되는 한 쌍의 대칭인 와류 영향으로 판단된다.

3) 압축행정 말기에 실린더 내부의 난류 운동에너지는 장행정 기관에서 더욱 높고 고른 분포를 나타냈다. 이러한 유동장 특성은 기관이 공전상태 및 저부하와 저속으로 운전할 때 연소속도 차이가 심해져서 발생하는 연소변동을 줄여 기관 효율을 증가시킬 수 있을 것이다.

후 기

본 연구에 많은 도움을 주신 Schock 교수님과 이근철 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Regan, C. A., Chun, K. S. and Schock, H. J., 1987, "Engine Flow Visualization Using Copper Vapor

Laser", Proceedings of SPIE, Vol. 737, pp. 17-27.

- 2) Heywood, J. B., 1988, "Internal Combustion Fundamentals", McGraw-Hill, New York.
- 3) Coghe, A., Gamma, F., Mauri, M., Brunello, G., Culderini, F. and Antoni, L., 1985, "In-Cylinder Air Flow Measurements by Laser Velocimetry under Steady-State Flow Conditions", SAE Paper No. 850123.
- 4) Snauwaert, P. and Sierens, R., 1986, "Experimental Study of the Swirl Motion in Direct Injection Diesel Engines under Steady State Flow Conditions (by LDA)", SAE Paper No. 860026.
- 5) Lee, Keunchul, Yoo, Seoung-Chool, Stuecken, Tom, McCarrick, Dan, Schock, Harold, Hamady, Fakhri, LaPointe, Leon A., Keller, Philip and Hartman, Peter., 1993, "An Experimental Study of In-Cylinder Air Flow in a 3.5L Four-Valve SI Engine by High Speed Flow Visualization and Two-Component LDV Measurement", SAE Paper No. 930478.
- 6) Yoo, S.-C., Lee, K., Novak, M., Schock, H., 1995, "3-D LDV Measurement of In-Cylinder Air Flow in a 3.5L Four- Valve SI Engine", SAE Paper 95648.
- 7) Potter, M., Foss, J., 1982, "Fluid Mechanics", Great Lakes Press.
- 8) Witz P.O., 1980, "A Critical Comparison of Hot-Wire Anemometry and Laser Doppler Velocimetry for IC Engine Applications", SAE Paper 800132.