

3차원 LDV를 이용한 실린더내 공기 유동특성에 관한 연구

유성출[†]

A Study on the Characteristics of In-Cylinder Air Flow with 3-D LDV Measurement

S. C. Yoo

Key Words: Turbulent kinetic energy (난류 운동에너지), Three-component LDV system (3차원 LDV 시스템), Ensemble averaged velocity(앙상블 평균속도), Motoring(모터링), Transient tumble ratio(과도 텀블비), Vortex(와류)

Abstract

In-cylinder flows in a motored 3.5L four-valve SI engine were investigated quantitatively using three-component LDV system, to determine how engine configuration affects the flow field. The purpose of this work was to develop quantitative methods which correlate in-cylinder flows to engine performance. For this study, two distinct intake/piston arrangements were used to examine the flow characteristics.

Quantification of the flow field was done by calculating two major parameters which are believed to characterize adequately in-cylinder motion. These quantities were turbulent kinetic energy(TKE) and tumble ratio in each plane at each crank angle.

The results showed that in-cylinder flow pattern is dominated by the intake effects and two counter rotating vortices, developed during the intake stroke, produced relatively low tumble ratio. Therefore, the applicability of these quantities should be carefully considered when evaluating characteristics resulting from the complex in-cylinder flow motions.

1. 서론

가솔린 엔진의 희박연소(lean combustion)는 유해 배기 물질의 발생 저감과 엔진의 효율을 향상시키는 것으로 보고되고 있다⁽¹⁾. 그러나 공연비 약 16:1 에서 NOx 배출물은 최고에 달하며, 공연비가 더욱 감소하면 NOx 배출물도 낮은 수준으로 감소하나 연소 과정이 점점 늦어지게 되며 지연 기간은 증가한다⁽²⁾. 연소 시스템의 희박 연소 능력을 향상시키는 가장 효과적인 방법 중의 하나

는 난류 강도를 증가시켜서 연소율을 향상시키는 것이다.⁽³⁾

따라서 난류 강도의 특성은 공기·연료의 혼합과 연소 과정에서 매우 중요하게 취급되며, 실린더 내부 텀블 등의 체적(bulk)유동 발달 과정과 난류 강도의 상관관계는 중요한 연구 대상으로 부각되고 있는 실정이다.

Kent 등⁽⁴⁾은 3개의 다른 4-밸브 실린더 헤드를 사용한 실험에서 연소 지속 기간(burn duration)은 텀블(tumble) 이나 스월(swirl)의 강도 증가에 따라 감소한다고 밝혔다. 그리고 Arcoumanis 등⁽⁵⁾은 흡입 과정중 전반(first half) 동안의 유동장은 큰 와류(vortex)에 의하여 지배되고 흡입 말기에서는

[†] 책임저자, 회원, 한라대학교 기계자동차공학부

E-mail : scyoo@hit.halla.ac.kr

TEL : (033)760-1215

이러한 유동장의 구성이 점점 약화되며 압축 초기 과정에서 소멸됨을 유동 가시화 실험으로 나타냈다. Regan 등⁽⁶⁾은 300rpm으로 모터링 되는 엔진 내부의 공기 유동을 관찰하기 위한 고속 유동 가시화 실험에서 피스톤이 흡입 과정의 말기로 접근할 때 흡입 초기에 형성된 큰 와류는 부서지고, 흡입 과정의 끝까지 잔류하는 와류 구조는 초기의 압축 과정까지 지속되며, 그 후의 유동 구조는 압축 과정에 의하여 변화됨을 최초로 보여주었다.

4-밸브 실린더 헤드를 포함하는 연소실 형상은 텀블 등 체적유동을 유도하여 좋은 희박 연소 특성을 갖도록 개발되었다. 이에 관한 연구는 지난 수 년 전부터 꾸준히 지속되고 있으며, 4-밸브 실린더 헤드 설계는 엔진 성능을 향상시키는 효과적인 방법이라고 공통적으로 보고하고 있다.^(7, 8) 그러므로 연소실 내부 유동장의 명확한 파악과 그에 따른 흡입포트와 피스톤 등의 형상 최적화를 통하여 엔진의 희박연소 능력을 더욱 개선할 수 있다고 판단된다.

Coghe 등⁽⁹⁾은 실린더 헤드의 헬리컬 흡입포트의 유동특성 분석에서 서로 다른 유동 패턴은 동일한 값의 각 운동량을 가질 수 있으며 회전 중심의 결정에 의하여 각 운동량 값은 변화될 수 있음을 나타냈다. Snauwaert와 Sierens⁽¹⁰⁾은 1개의 스윙 파라미터는 여러 가지 다른 영향의 종합이므로 유동 패턴의 정확한 결론을 1개의 파라미터 측정에서 의하는 것은 거의 불가능하다고 밝히고 있다. Coghe 등⁽¹¹⁾은 체적유동과 난류 구조에 대한 영향을 관찰하기 위하여 정상 유동 상태에서 2개의 흡입포트 형상의 실린더를 사용하였으며 효과적인 해석을 위해서는 정상 유동 상태보다는 모터링 상태에서 분석되어야 함을 제안하고 있다.

본 연구의 목적은 보다 효율적인 엔진 개발에 필요한 연소 기술의 향상을 위하여 필수적인 실린더내 유동의 명확한 이해를 위한 분석적 실험 도구의 개발에 있다. 선행 연구에서 Yoo, Lee와 Schock^(8, 12)은 실린더 내부의 유동을 해석하기 위하여 3차원 LDV측정을 1개의 측정 면에서 처음으로 실시하였다. 또 유동을 효과적으로 분석하기 위해서는 더욱 많은 데이터 취득과, 체적유동 패턴을 비교하기 위하여 텀블 등의 계산이 필요함을 강조하였다. 따라서 본 연구에서는 피스톤

과 흡기포트의 설계가 다른 3.5L 4-밸브 엔진 내부의 유동장 특성을 모터링 상태에서⁽¹³⁾ 3-차원 LDV 시스템을 사용하여 분석하였으며, 형상 변화가 유동장의 형성 과정과 난류 운동에너지에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에는 AVL 싱글 실린더 연구용 엔진 (type:520)을 사용하였다. 실험 장치는 2종류의 피스톤과 흡기포트를 쉽게 교환할 수 있고 3000rpm 까지 모터링 할 수 있도록 설계 제작되었으며 속도 변환 가능한 직류 모터와 AVL 크랭크 샤프트를 통하여 연결하였다. 형상A의 pop-up 피스톤은 밸브 장치가 작동하지 않을 경우 피스톤을 보호하기 위하여 피스톤 크라운에 밸브 모양의 움푹 들어간 모양을 가지고 있다. 실험에 사용된 엔진의 주요 사양은 Table 1과 같다.

본 실험을 위하여 투명한 9.5mm 두께의 내경 96mm 석영 실린더를 제작하였다. 연소실 내부의 유동은 석영 실린더를 통하여 360° 관찰이 가능하며 실린더는 Rulon-LD 개스킷을 사용하여 엔진 헤드와 어댑터 플레이트 사이에 설치하였다. 피스톤과 나사의 모든 부분은 빛에 의한 반사를 줄이기 위하여 모두 검정색 페인트칠을 하였다. 실제의 피스톤링은 석영 실린더 표면에 쉽게 흡집을 내므로 고열·고압에 잘 견디고 흡집을 내지 않는 특수 피스톤링을 제작하여 사용하였다. 또한 특수 피스톤링은 윤활을 필요로 하지 않기 때문에 좋은 광학적 접근성을 얻을 수 있었다.

Table 1 Engine configurations

Configuration	A	B
Piston head	Pop-up	Dish
Intake port	50% blocked	0% blocked
Peak pressure(KPa)	1351	1289
Compression ratio	9.5	9.0
RPM	600	600

2.2 3차원 LDV 시스템

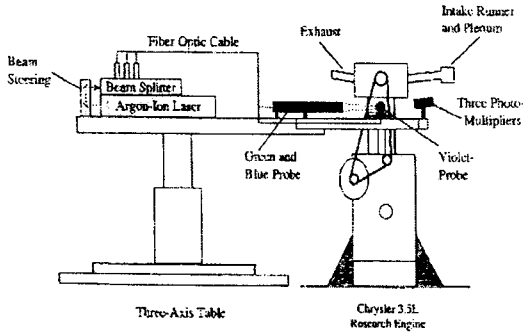


Fig. 1 LDV test stand setup

Ar-Ion 레이저로부터 나오는 빔은 프리즘에 의하여 여러 개의 단 파장(single-wavelength)빔으로 나누어지며 그중 블루 빔(488.0nm)은 x-성분, 그린 빔(514.5nm)은 y-성분, 그리고 바이올렛 빔(476.5nm)은 z-성분의 속도 측정을 위하여 사용하였다. 레이저 빔의 측정 체적 내에 있는 입자에 의하여 산란된 도플러 신호는 광전자증배관(PMT)에 의하여 감지되며 digital burst correlator에 의하여 처리되었다. Bragg-cell frequency shifter는 마이너스 성분의 속도 측정을 위하여 설치하였다. 3차원 LDV 시스템의 개략도는 Fig. 1과 참고 문헌⁽¹²⁾에 잘 나타나있다.

2.3 LDV 산란 입자

산란 입자의 가장 중요한 특성은 SNR(signal-to-noise ratio)와 유체 유동을 잘 따라가는 정도를 나타내는 공기역학적 크기이다. 또한 광학적 접근성의 저하를 가져오는 관측창의 오염, 독성, 부식 영향 그리고 농도(concentration)와 균일성(uniformity)도 중요하다. 이상적인 산란 입자는 유체와 같은 밀도, large effective area, 균일성을 가지며 또한 농도의 조절이 용이해야 한다.

큰 입자는 관성 영향으로 인하여 유동을 정확하게 따라가는 것이 불가능하며 작은 입자는 충분한 시그널 강도를 갖지 못한다. 입자에 대한 Stokes law의 가정에 의하면, 입자가 난류 유동을 충실히 따라가는 정도를 나타내는 기본 매개변수는 입자 완화 시간(relaxation time) τ 와 난류의 Lagrangian macro-time scale T의 비이다. 만약 τ

$\tau \ll T$ 이면 입자는 난류 유동을 완전하게 따라가며, $\tau/T < 0.02$ 이면 입자는 유동을 따라간다.

레이놀즈수가 1보다 작고 밀도가 유체 밀도보다 큰 구상 입자에서 입자 완화 시간은 다음과 같이 주어진다.

$$\tau = \rho_p d_p^2 / 18 \eta \tag{1}$$

여기서,

ρ_p = 입자밀도

d_p = 입자직경

η = 평균 가스의 점성

Lagrangian macro-time scale은 $T = \epsilon / v^2$ 으로부터 구할 수 있으며 여기서 ϵ 은 momentum eddy diffusivity 그리고 v^2 은 난류 강도이다.⁽⁶⁾ 그러므로 선택된 입자가 유동을 따라가기 위해서는 다음과 같은 관계식을 만족해야 한다.

$$\rho_p d_p^2 \leq 0.36 \eta \epsilon / v^2 \tag{2}$$

위의 식에서 $(\rho_p d_p)^{1/2}$ 은 입자의 공기역학 지름 d_a (aerodynamic diameter)로 정의된다.

자연적으로 발생하는 에어로솔과 하이드로솔은 가장 편리하며 가끔 만족할 만한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 자연적인 입자는 매우 넓은 범위의 크기 분포를 가지고 있다. 따라서 많은 양의 입자는 크기가 너무 작아 측정할 수 있는 시그널을 만들지 못하며 큰 입자는 급격히 가속되는 유동을 따라가지 못한다. 또한 자연적으로 발생하는 입자의 농도는 조절되지 못하는 단점이 있다.

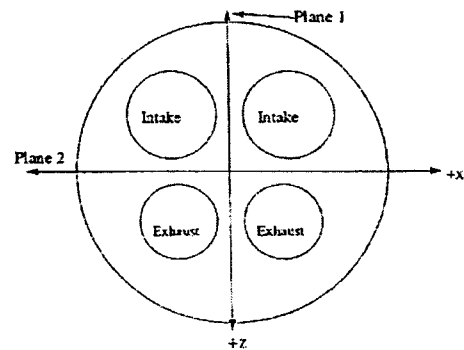


Fig. 2 Measurement plane locations and cylinder coordinate system

위와 같은 요소가 LDV의 광학적 특성 설계, 신호 처리와 데이터의 정리에 영향을 주므로 인위적으로 유동에 입자를 공급하는 것이 가장 간단하고 만족할 만한 방법이다. 따라서 propylene glycol과 물의 혼합물을 분무하여 산란 입자로 사용하였으며 분무된 입자 크기의 범위는 0.6 - 1.5 μm 이었다.

2.4 LDV 측정과 데이터 처리

난류 유동의 중요한 특성은 난류의 불규칙성과 무작위성이다. 이러한 변동은 모든 방향으로 일어나며, 난류 유동장을 정의하는 데는 측정 데이터의 통계적 서술을 이용하고 있다. LDV 측정에 의한 실린더내 난류의 정량적 해석은 통상 앙상블 평균속도와 앙상블 평균난동(ensemble averaged fluctuation)을 사용 하고 있다. 앙상블 평균속도는 실린더내의 속도분포 및 텀블비를 나타내는데 사용하였으며 앙상블 평균난동은 난류 운동에너지를 나타내는데 사용하였다. 본 연구에서는 앙상블 평균값을 1.8°의 크랭크 각 쪽에서 취득한 데이터를 기본으로 구하였으며, 데이터는 각각의 측정 위치에서 수천 사이클에 걸쳐서 취득하였다. 크랭크 각의 폭이 너무 작으면 속도가 측정되는 데이터 율이 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. Witze⁽¹⁴⁾는 동적 현상이 있을 경우 크랭크 각의 폭은 2° 범위가 적절하다고 그의 실험에서 보고하고 있다.

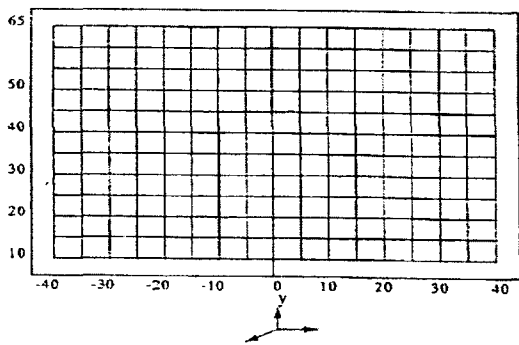


Fig. 3 Measurement grid

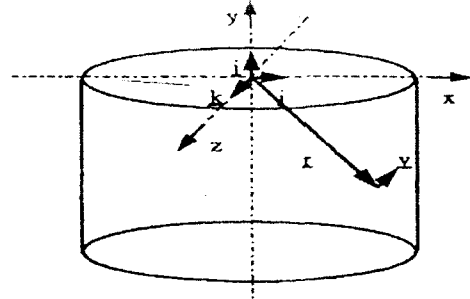


Fig. 4 Fixed origin at TDC

작고 좌표계와 측정 면은 Fig. 2에 표시되어 있으며 좌표계의 중심은 피스톤이 BDC에 있을 때 피스톤 표면의 중심이다. 측정 면1은 흡기 밸브 사이를 통과하는 센터(center)면이며, 측정 면2는 흡기 밸브와 배기 밸브 사이를 통과하고 측정 면1과 서로 수직인 센터면 이다. LDV 측정은 2개의 서로 다른 각각의 측정 면에서 Fig. 3과 같이 5mm 격자(grid)를 만들어 실시하였다.

각 측정 위치의 좌표와 데이터는 측정 면에서의 전체적인 유동장 특징을 크랭크 각의 변화에 따라 나타내기 위하여 처리 하였다. 이러한 자료는 측정 면에서 정량적인 값을 계산하는데 사용 하였다. 계산된 값의 그래프와 그림은 유동 패턴 그리고 텀블 등의 체적유동 발달 과정을 연구하는데 매우 귀중한 자료를 제공하며 특히, 난류 운동에너지 변화와 크랭크 각의 상관관계를 밝히는데 유용하게 이용되고 있다. 텀블비를 계산하는 데는 TDC origin(Fig. 4)을 사용하였으며, TDC origin은 피스톤이 TDC에 있을 때 피스톤 표면의 중심이다. 난류 운동에너지 ($\overline{q'^2}$)는 실린더 내의 공기 온도가 행정이 진행되는 동안 주위 공기 온도와 동일하여 공기 밀도가 일정하다는 가정 하에 식(3)과 같이 계산하였으며, 텀블비 (T_x, T_z)와 데이터 처리 과정의 자세한 대응은 참고문헌^(15, 16)에 잘 나타나 있다.

$$\overline{q'^2} = \frac{1}{2}[\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}] \quad (3)$$

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

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 실린더 내부의 속도분포

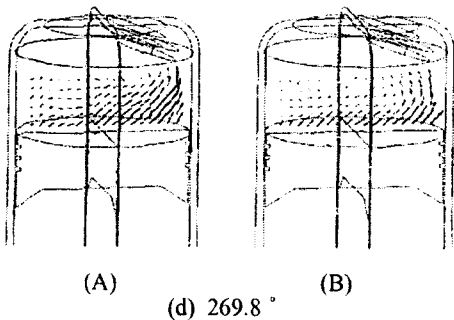
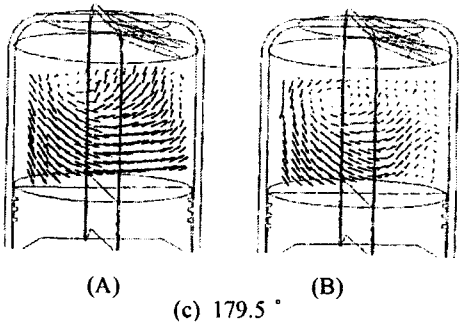
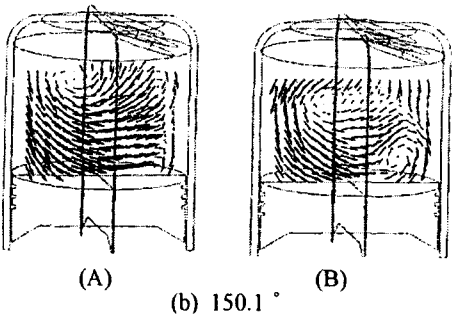
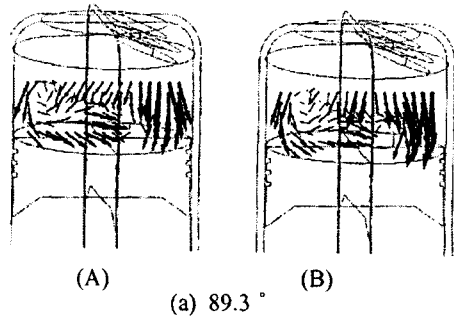


Fig. 5 Vector fields for plane 1 at each crank angle

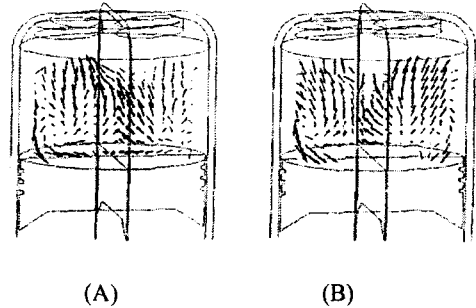


Fig. 6 Vector fields for plane 2 at crank angle 120.6°

Fig. 5는 엔진이 600rpm으로 모터링될 때 측정면1에서의 평균 유동패턴을 나타내며, Fig. 6은 측정면2에서의 평균 유동패턴을 나타낸다. 그림에서 측정면1의 우측 상단에는 흡기 밸브가 설치되어 있으며, 측정면2의 앞쪽 상단에는 배기 밸브가 설치되어 있다. 측정은 5mm 간격의 204 격자 위치에서 각각 실시하였다. 실린더 벽과 벽에 가까운 부분에서는 석영 실린더 곡면의 영향으로 측정이 불가능하였다. 그림에서 점은 측정 위치를 나타내며 선은 속도의 크기와 방향을 나타낸다.

3.1.1 측정면1에서의 속도분포

(가)형상A

흡입 과정 초기에 실린더 윗부분을 가로질러 들어오는 강력한 제트 유동은 실린더 벽을 따라 내려오다가 +z영역에서는 피스톤 헤드 면에 의하여 전향되어 피스톤 표면 위를 따라 움직이다가 반대쪽 유동과 부딪혀 실린더 축을 따라 올라가면서 반 시계방향 와류를 형성한다. 이러한 유동 특성은 크랭크 각 약 80° 부근에서 잘 나타나고 있다. 크랭크 각 약 90° 까지 일반적으로 2개의 중요 유동 패턴이 발달하는 것을 관찰할 수 있었다: 하나는 +z영역에서 형성되는 반 시계방향 와류이고, 다른 하나는 -z쪽의 실린더 벽을 따라 피스톤 쪽으로 내려오는 흐름이다. 피스톤 표면에서 발생하는 유동 박리는 텀블 유동을 만들었으며 이것은 흡입 과정에 발생하는 매우 주목할 만한 특징이다. 흡입 과정이 계속 진행되면서 와류 영역은 커지며 위 방향으로 이동하였고, 실린더 벽을 따라 내려오는 유동은 서서히 감소하다가

크랭크 각 약 190° 부근에서는 유동 방향이 완전히 바뀌는 것을 관찰할 수 있었다. 압축 과정에서는 와류 중심이 계속해서 위쪽과 오른쪽 방향으로 이동하고 텀블 유동의 특징이 형상B의 경우와 비교하여 오래 지속되는 것을 관찰할 수 있었다.

(나)형상B

흡입 과정 초기의 유동 패턴 특징은 +z영역에 반 시계방향 와류를 형성하는 것으로 형상A와 유사하다. 이러한 유동 패턴은 동일한 흡입포트와 밸브 형상의 영향으로 생각된다. 크랭크 각 약 100° 이후에는 -z쪽 실린더 벽을 따라 피스톤 쪽으로 내려오는 흐름의 강도가 형상A의 경우보다 강하여 피스톤 표면 위를 따라 움직이는 반대쪽 유동을 피스톤 표면 위에서 박리 시키면서 실린더 벽을 따라 들어오는 유체와 함께 -z영역 피스톤 바로 위에 또 하나의 시계방향 와류를 형성하였다. 형상B에서만 관찰되는 특이한 유동 현상이다. 그러나 흡입 말기 과정에서 이 시계방향 와류는 세력이 약화되어 소멸되면서 BDC 전에 1개의 와류로 합쳐지고, +z쪽에서 들어오는 유체에 의하여 형성된 텀블 유동이 실린더 내부 유동 구조를 지배하여 BDC에서는 반 시계방향 와류만 관찰할 수 있었다. 압축 과정에서의 유동 패턴은 형상A와 비교하여 속도가 낮은 값을 나타내는 것을 제외하고는 비슷하였다.

3.1.2 측정 면2에서의 속도분포

측정 면1에서와 마찬가지로 흡입 과정 초기에 형상A와 B에서 유동 구조의 차이점은 쉽게 찾을 수 없었다. 흡입 제트와 실린더벽 그리고 피스톤 표면과의 상호작용은 대칭인 회전 유동 패턴을 만들며, 회전 유동 패턴의 중심은 피스톤과 함께 계속 움직여 피스톤과 헤드의 중간 부분에 존재한다. 크랭크 각 약 110° 부분에서는 유동장의 특징이 3가지로 구별되어진다: 1) -x영역 밑에서는 회전 운동이 발달하기 시작하고, 2) +x영역에서는 유동이 오른쪽으로 기울면서 위쪽으로 향하고, 3) 피스톤 바로 위의 중심부분에서는 강한 유동이 -z방향을 향한다. 흡입 과정 말기에는 -x영역의 회전 운동은 계속 남아있고, +x영역에서는 오른쪽으로 향하던 유동방향이 왼쪽으로 방향을 바꾸는 것이 관찰되었다. 피스톤 바로 위의 중심부분에서 -z쪽으로 향하던 유동 패턴은 강도는

약해졌으나 지속되었다. 흡입 과정은 밸브의 닫힘으로 종료되며 계속 이어지는 압축 과정의 초기 조건을 형성한다. 압축 과정이 시작되면서 -x쪽 실린더 벽을 따라 내려오던 유동은 방향을 바꾸어 실린더 중심부분을 향하며 압축 과정이 계속 진행될수록 피스톤에 가까운 영역은 실린더 위 부분으로, 헤드 밑 영역은 반지름 방향으로의 유동 특성을 보여주고 있다. 압축 말기에 형상B의 유동장 구조는 형상A보다 잘 정돈된 것 같이 보였다. 측정 면1쪽 실린더 벽을 따라 강하게 내려오는 유동 특성에 의하여 형성된 텀블 등의 유동이 압축 말기의 유동장 구조 특성을 결정짓는 중요한 인자로 판단된다.

3.2 난류 운동에너지

Fig. 7은 흡입과 압축 과정에 일어나는 난류 운동에너지와 크랭크 각의 관계를 나타낸다. 난류 운동에너지는 2개의 서로 다른 측정 면에서 각각 계산하였다. 난류 운동에너지의 변화는 전체적으로 비슷한 경향을 가지고 있으며 실험에 사용된 형상의 난류장에 대한 영향을 그림으로부터 관찰할 수 있다. 초기 흡입 과정에서 실린더 내부의 유동은 높은 강도의 난류이며 난류 운동에너지는 흡기 밸브를 통하여 들어오는 제트에 의해 생성된다. 이러한 유동의 특성 때문에 초기 난류 운동에너지는 모든 측정 면에서 대체로 높은 값을 갖는다. 형상A의 측정 면2(A2)에서는 크랭크 각 약 80° 부근에서, 그 밖의 형상A의 측정 면1(A1), 형상B의 측정 면1(B1), 형상B의 측정 면2(B2)에서는 크랭크 각 약 70° 부근에서 최대 난류 운동에너지 값을 나타낸다. 흡입 과정 동안에 형상B의 난류 운동에너지 B1은 형상A와 비교하여 크랭크 각 약 110° 이후에 더욱 급격히 감소하였다. 이러한 현상은 측정 면1에서 크랭크 각 약 100° 이후에 생성된 또 하나의 시계방향 와류로 유동장이 서로 대칭 형태로 만들어지면서 난류 운동에너지가 감소되는 것으로 판단된다. 난류 운동 에너지를 생성시키기 위해서는 에너지가 필요하며, 더 이상 에너지가 공급되지 않으면 난류는 소멸한다. 흡입 밸브의 닫힘은 난류 생성 과정의 종료를 의미하며 따라서 난류 운동에너지가 서서히 감소하는 것을 보여준다. 가장 특이한 점은 형상A 측정 면2(A2)에서의 최고값이 다른 측정값들에 비하여 약 1/2정도인 것이다. 그와는 반

대로 형상A의 측정 면1(A1)에서는 전체적으로 높은 값을 나타내고 있다. 따라서 형상A의 변화된 흡기포트는 측정 면2에서 난류강도를 줄이고 측정 면1에서는 증가시키는 불균일한 난류강도 분포를 나타냈다. 흡입속도를 증가시켜서 높은 난류 강도를 얻고자 하였으나 오히려 흡입 과정 동안에 실린더 체적 내부에 불균일한 난류강도 분포를 만들었다. 형상B의 경우에는 측정 면 2곳(B1, B2)에서 거의 비슷한 난류강도 분포를 나타냄으로서 공기와 연료의 균일한 혼합기 형성에서 형상A보다 더욱 유리할 것으로 판단된다. 압축 과정 동안에는 4측정 면 모두에서 비슷한 경향을 보이고 있으나 형상A의 측정 면에서 약간 높은 값을 나타내고 있다. 위와 같은 결과로부터, 난류 운동에너지의 증가는 형상의 변화로부터 일어나는 회전 유동의 강도와 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 실린더 내부 전체 체적에 대한 난류 운동에너지의 생성 및 소멸에 대한 메커니즘을 크랭크 각의 변화에 따른 회전 유동의 강도 변화와 연계시켜 이해하는 것은 엔진의 성능을 향상 시키는데 매우 중요할 것으로 사료된다. 난류 운동에너지와 크랭크 각과의 관계를 분석함으로써 연소시의 최적 난류 운동에너지를 갖는 설계 변수를 구할 수 있으리라 생각된다.

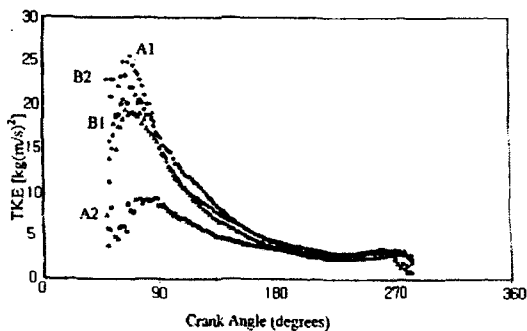


Fig. 7 Average turbulent kinetic energy

3.3 텀블비

실린더 내부에서 주가 되는 거시적 질량 운동은 텀블과 스윙이라고 하는 회전 운동이다. 스윙은 실린더 축을 중심으로 강제 와류 모양의 대규모 공기흐름이며, 이러한 유동이 실린더 축에 수직인 축에 대하여 일어날 때 이것을 텀블이라고

한다. 이러한 거시적 회전 유동은 흡기 매니폴드, 흡기포트 및 피스톤 표면의 형상에 의하여 특성되는 흡입 공기 유동의 초기 각 운동량에 의하여 생성된다.⁽²⁾ Fig. 8은 형상A 엔진과 형상B 엔진의 텀블비(T_x , T_z)의 특성을 동시에 비교한 그림이다. T_x 는 측정 면1에 수직인 축에 대한 텀블이며, T_z 는 측정 면2에 수직인 축에 대한 텀블이다. 흡입 초기 과정에 텀블비는 피스톤의 움직임과 함께 증가하며 크랭크 각 약 80° 부근에서 $T_x(A)$ 를 제외하고 최고값에 도달한다. 이 위치는 난류 운동에너지의 값이 최대인 부분과 거의 일치하는 것으로서 주목할 만한 현상이다. 최고값 이후 형상A의 T_x 는 크랭크 각 약 250° 까지 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보이며, 형상B에서는 형상A에 비하여 흡입 과정 동안 더욱 급격히 감소하다가 압축 과정에서는 거의 일정한 값을 유지한 후 크랭크 각 약 270° 부근에서 다시 약간 상승하는 것으로 나타났다. 전체적으로 볼 때 초기 값은 비슷하지만 행정이 진행되면서 형상A에서의 T_x 는 서서히 감소하며 대체로 형상B 엔진에 비하여 높은 값을 나타낸다. 이러한 특징은 형상B의 흡입 과정 중간에 생성된 시계방향 와류의 영향으로 짐작할 수 있다. 다시 말하면 서로 반대 방향으로 회전하는 와류가 형성된 유동장에서 계산한 텀블비는 1개의 와류가 형성된 경우보다 작은 값을 갖기 때문이다. 따라서 유동 패턴이 서로 다른 유동장을 비교할 경우 텀블비의 사용은 매우 주의해야 할 것으로 판단된다.

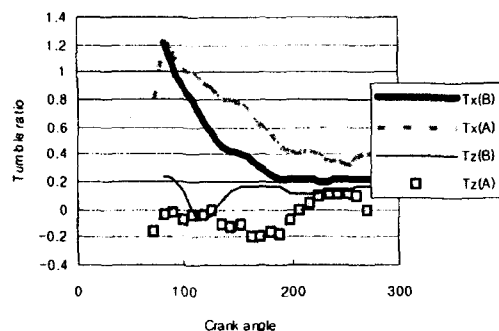


Fig. 8 Tumble ratio for TDC origin

측정 면2에서 형상A 엔진과 형상B 엔진의 텀

블비(T_2) 변화는 흡입과정 동안에 방향은 서로 반대이지만 비슷하며, 측정 면1에서의 텀블비(T_1)와 비교하여 작은 값을 갖는다. 이러한 현상은 측정 면2에서 나타나는 2개 유입 유동의 상호 작용으로 대칭인 유동장 패턴을 형성하기 때문인 것으로 사료된다. 압축과정 동안에 $T_2(B)$ 는 거의 일정한 값을 유지하며 $T_2(A)$ 는 크랭크 각 약 210° 부근에서 방향을 바꾸는 현상을 나타낸다. 1개의 파라미터는 여러 가지 다른 영향의 종합이므로 유동장의 특성 분석을 위하여 1개의 파라미터에 의존하는 것은 효과적인 방법이 아닌 것으로 판단된다.

4. 결론

피스톤과 흡기포트 형상 설계의 변화에 따른 3.5L 4-밸브 실린더내의 체적유동 발달 과정과 난류강도의 특성을 3차원 LDV측정을 이용하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 흡기 형상이 피스톤 표면 형상보다 실린더 내부의 거시적 유동 패턴에 더욱 큰 영향을 미치며 흡입 과정 중에 형성된 유동 패턴은 압축 과정까지 지속되었다.

(2) 실린더 내부의 유동을 정량적으로 해석하기 위하여 2가지 방법(난류 운동에너지, 텀블비)을 사용하였다. 텀블비는 동일한 실험 조건에서 측정 면에 따라 차이를 보였으며 난류 운동에너지는 형상B에서 균일한 분포를 나타냈다.

(3) 서로 반대 방향으로 회전하는 와류가 유동장내에 형성될 경우에 텀블비가 급격히 감소하는 것을 알 수 있었다. 더욱이 텀블비는 solid body 회전 유동을 비교하는데 적절하며, 서로 다른 유동 패턴의 비교를 1개의 파라미터 계산에 의하는 것은 부적절함을 확인할 수 있었다.

(4) 일반적으로 실린더 내의 난류 운동에너지는 텀블과 같은 회전 유동의 조절로 컨트롤될 수 있다고 생각된다. 또한 피스톤 표면 형상은 TDC 근처의 난류 운동에너지 조절에 효과적으로 이용될 수 있음을 알 수 있다.

(5) 압축 과정의 난류 운동에너지 분석에서 pop-up 피스톤을 장착한 엔진에서 보다 큰 값을 얻을 수 있었다.

참고문헌

- (1) Henriot, S., Le Coz, J. F. and Pinchon P., "Three-Dimensional Modeling of the Flow and Turbulence in a Four-Valve S. I. Engine - Comparison with LDV Measurements," SAE Paper No. 890843, 1989.
- (2) Heywood, J. B., "Internal Combustion Fundamentals," McGraw-Hill, New York, 1988.
- (3) Weaving, J. H., "Internal Combustion Engineering," Elsevier Science Publishing Co., Inc., 1990.
- (4) Kent, J. C., Mikulec, A., Rimal, L., Adamczyk, A. A., Mueller, S. R., and Warren, C. C., "Observation of the Effects of Intake Generated Swirl and Tumble on Combustion Duration," SAE Paper No. 892097, 1989.
- (5) Arcoumanis, C., Green, H. G., and Wong, K. Y., "Flow Structure Visualization in Reciprocating Engines," Proceedings of the Fourth Symposium on Flow Visualization, August 26~29, 1986.
- (6) Regan, C. A., Chun, K. S. and Schock, H. J., "Engine Flow Visualization Using Copper Vapor Laser," Proceedings of SPIE, Vol. 737, 1987, pp. 17~27.
- (7) Le Coz, J. F., Henriot, S. and Pinchon, P., "An experimental and Computational Analysis of the Flow Field in a Four-Valve Spark Ignition Engine - Focus on Cycle-Resolved Turbulence," SAE Paper No. 900056, 1990.
- (8) Lee, Keunchul, Yoo, Seoung-Chool, Stuecken, Tom, McCarrick, Dan, Schock, Harold, Hamady, Fakhri, LaPointe, Leon A., Keller, Philip and Hartman, Peter, "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, 1993.
- (9) Coghe, A., Gamma, F., Mauri, M., Brunello, G., Culderini, F. and Antoni, L., "In-Cylinder Air Flow Measurements by Laser Velocimetry

- under Steady-State Flow Conditions," SAE Paper No. 850123, 1985.
- (10) Snauwaert, P. and Sierens, R., "Experimental Study of the Swirl Motion in Direct Injection Diesel Engines under Steady State Flow Conditions (by LDA)," SAE Paper No. 860026, 1986.
- (11) Coghe, A., Brunello, G., and Tassi, E., "Effects of Intake Ports on the In-Cylinder Air Motions under Steady Flow Conditions," SAE Paper No. 880384, 1988.
- (12) Yoo, S.-C., Lee, K., Novak, M., Schock, H., "3-D LDV Measurement of In-Cylinder Air Flow in a 3.5L Four-Valve SI Engine," SAE Paper 95648, 1995.
- (13) Khalighi, Bahram, "Intake-Generated Swirl and Tumble Motions in a 4-Valve Engine with Various Intake Configurations-Flow Visualization and Particle Tracking Velocimetry," SAE Paper No. 900059, 1990.
- (14) Witz P.O., "A Critical Comparison of Hot-Wire Anemometry and Laser Doppler Velocimetry for IC Engine Applications," SAE Paper 800132, 1980.
- (15) Jaffri, K., Hascher, H., Novak, M., Lee, K., Schock, H., "Tumble and Swirl Quantification within a Motored Four-Valve SI Engine Cylinder Based on 3-D LDV Measurements," SAE Paper 970792, 1997.
- (16) Hascher, H., Jaffri, K., Novak, M., Lee, K., Schock, H., "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 Paper 970793, 1997.