

늦은 흡기 밸브 닫힘 전략이 가솔린 직접분사식 엔진 내 유동 특성에 미치는 영향

곽 예 승 · 김 경 곤 · 배 충 식*

한국과학기술원 기계공학과

Effect of the Late Intake Valve Closing(LIVC) Strategy on In-Cylinder Flow in a Gasoline Direct Injection Engine

Yeseung Kwak · Gyeonggon Kim · Choongsik Bae*

Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 34141, Korea

(Received 27 December 2024 / Revised 10 February 2025 / Accepted 10 February 2025)

Abstract : The global automotive industry is increasingly focused on improving fuel efficiency and reducing greenhouse gas emissions. Consequently, since using electric vehicles poses some challenges, such as safety concerns and EV chasm, the hybrid electric vehicle market is continuously expanding. The Atkinson cycle, commonly implemented using Late Intake Valve Closing(LIVC), is a thermodynamic cycle in hybrid engines, offering high efficiency and fuel economy. However, it exhibits lower turbulent kinetic energy(TKE) than the Otto cycle. This study analyzed in-cylinder flow, including TKE under the effects of LIVC. Experiments were conducted using a quartz-liner optical engine and particle image velocimetry(PIV) to measure mean velocity, tumble ratio, and TKE. The results showed that delaying the intake valve closing timing to 163 CAD bTDCfiring increased velocity and tumble ratio, but, further delays weakened these parameters and reduced TKE. These findings highlight the crucial role of optimized IVC timing in improving engine efficiency and carbon neutrality.

Key words : Late intake valve closing(늦은 흡기 밸브 닫힘), Turbulent kinetic energy(난류 운동 에너지), Tumble ratio(텀블 비), Mean velocity(평균 유속), Particle image velocimetry(입자 영상 유속계)

Nomenclature

aTDC : after top dead center
 bTDC : before top dead center
 CAD : crank angle degree
 CVVD : continuously variable valve duration
 CW : continuous wave
 EIVC : early intake valve closing
 EVC : exhaust valve closing
 FPS : frame per second
 IVO : intake valve opening
 LIVC : late intake valve closing
 PIV : particle image velocimetry
 RPM : revolution per minute
 TKE : turbulent kinetic energy

1. 서 론

최근 글로벌 자동차 산업은 연비 개선과 온실가스 배출 저감의 필요성이 대두됨에 따라 하이브리드 차량 시장이 빠르게 성장하고 있다. 전기차는 친환경 자동차로 주목받았으나, 안전성 문제와 ‘전기차 캐즘’¹⁾ 위기 등으로 인해 시장 확대에 한계를 보이고 있다. 특히, 2024년 미국 대선 이후 환경정책 변화 가능성이 전기차 전환 속도를 지연시킬 수 있다는 우려가 제기되고 있다.²⁾ 이러한 상황에서 내연기관과 전기차의 중간 단계로 평가받는 하이브리드 차량은 연비와 배출가스 저감 측면에서 큰 관심을 받고 있으며, Fig. 1은 하이브리드 차량의 글로벌 시장 확장 추세를 시각적으로 보여준다.³⁾

하이브리드 차량은 내연기관, 발전기, 배터리, 전기모터의 조합으로 기존 내연기관 차량에 비해 연비와 출력

*Corresponding author, E-mail: csbae@kaist.ac.kr

¹⁾This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

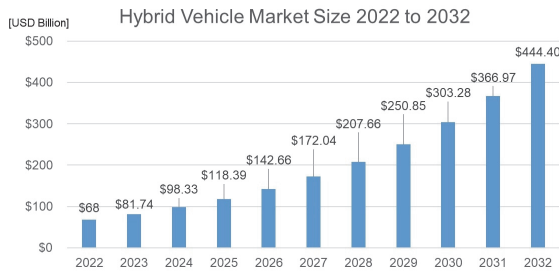


Fig. 1 Hybrid Vehicle Market Size 2022 to 2032

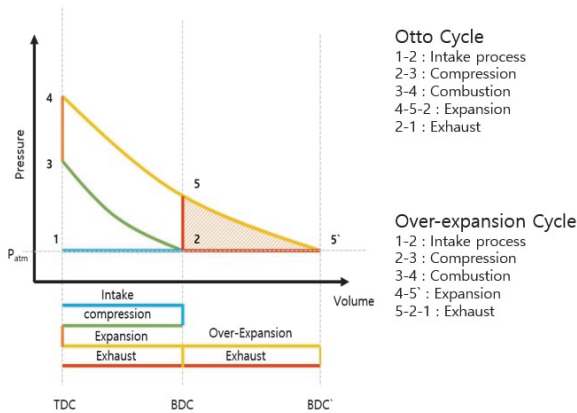


Fig. 2 P-V diagram of Otto cycle and over-expansion cycle

이 높고, 배출가스가 적다.⁴⁾ 특히, 하이브리드 차량은 저속 구간에서 전기모터로 출력을 보완할 수 있어, 오토 사이클 대신 과팽창 사이클(Over-expansion cycle)을 적용한다. 이 사이클은 실제 팽창 비를 압축 비보다 높게 설정해 열효율을 향상시키며, 압축 과정을 상대적으로 줄여 노킹(Knocking)을 억제하는 데 도움을 준다.⁵⁾ Fig. 2는 오토 사이클과 과팽창 사이클의 압력-부피 관계를 비교하여 이 차이를 시각적으로 나타낸다.

과팽창 사이클의 구현은 가변 밸브 제어 기술을 통해 가능하다. 가변 밸브 제어 기술은 특히 LIVC(Late Intake Valve Closing) 방식은 흡기 밸브 닫힘 시점을 지연시켜 팽창비를 높임으로써 열효율을 극대화한다. Fig. 3은 압력-부피 그래프를 통해 오토 사이클과 과팽창 사이클의 차이를 보여준다. 선행 연구에 따르면, LIVC를 적용하면 높은 부하 조건에서 노킹 저항성이 향상되며, 연료 소비 절감 효과가 크다는 점이 확인되었다. 반면, 저부하 조건에서는 펌핑 손실이 감소하지만, 연료 소비 측면에서 부정적인 영향을 미칠 수 있다.⁶⁾ 그러나 LIVC는 고속 구간에서의 성능 향상에 유리한 반면, 충분한 난류 운동 에너지를 확보하는 데 한계를 가진다.⁷⁾ Fig. 4는 LIVC, EIVC(Early Intake Valve Closing), Otto cycle을 난류 운동 에너지

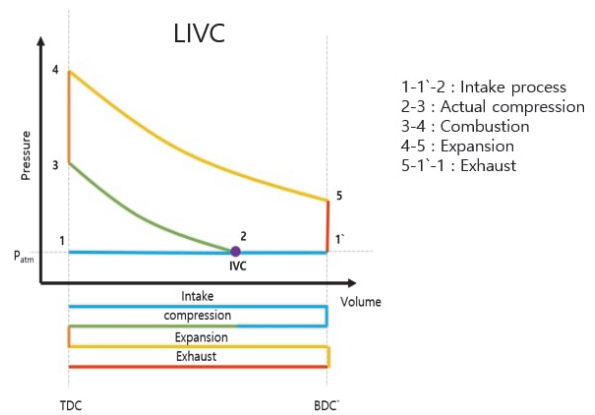


Fig. 3 P-V diagram of LIVC cycle

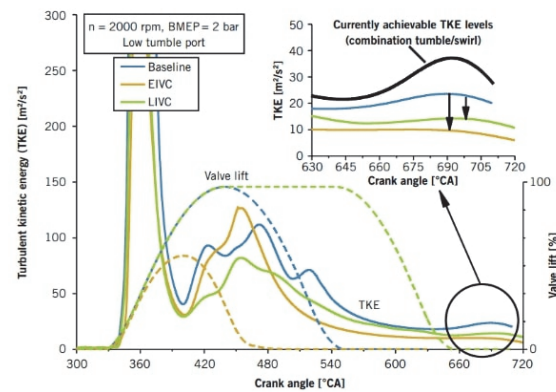


Fig. 4 TKE in Otto cycle, EIVC and LIVC cycle

지 관점에서 비교한 결과를 시각적으로 제시한다.

LIVC의 유동 특성을 살펴보면, 최대 실린더 압력이 약 20 % 감소함에도 불구하고 기본적인 유동 구조는 표준 오토 사이클과 큰 차이를 보이지 않는 것으로 보고되었다. 다만, 조기 압축 과정에서 열린 밸브를 통한 역류로 인해 속도 방향과 크기에 일부 변화가 발생하며, 이로 인해 평균 유동 변수가 소폭 증가하는 경향을 나타낸다. 또한, LIVC와 오토 사이클 모두에서 압축 종료 시점의 텀블 붕괴가 발생하며, 난류 혼합 특성 역시 유사한 수준을 유지하는 것으로 분석되었다. 특히, LIVC의 경우 텀블 와류 코어가 180 CAD aTDC 이후 측정 평면의 좌측 상단으로 더 빠르게 이동한 후, 실린더 내에서 텀블의 이동이 둔화되는 특성을 보인다.⁸⁾ 난류 운동 에너지는 연소 안정성과 효율을 좌우하는 주요 변수이며, 이 에너지는 실린더 내 대규모 텀블 유동이 압축 과정에서 작은 스케일로 붕괴되며 생성된다. Fig. 5는 텀블 유동이 압축 과정에서 난류 운동 에너지로 전환되는 과정을 단계적으로 보여준다.⁹⁾ 흡기 과정 초기에는 흡기 유속으로 인해

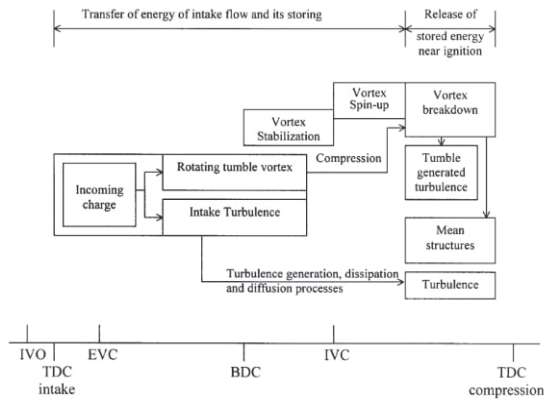


Fig. 5 Mechanism of turbulence enhancement due to tumble

텀블 유동과 난류가 생성되며, 압축 과정이 시작되면 텀블 유동이 점차적으로 작은 스케일로 붕괴되어 강한 난류 운동 에너지를 유발한다.

강한 텀블 유동은 연소 초기에 안정적인 화염 커널 형성과 빠른 화염 전파를 촉진해 연소 효율을 높이고 배출 가스를 감소시킨다.^{10,11)} 이러한 유동의 분석은 회박 연소 구현 및 하이브리드 차량 엔진 최적화에서 필수적이며, 최근 연구에서는 Particle Image Velocimetry(PIV)를 사용해 실린더 내 유동을 정량적으로 평가하고 있다.¹²⁻¹⁶⁾

본 연구는 가솔린 직접분사식 광학 엔진과 CVVD (Continuously Variable Valve Duration) 시스템을 활용해 LIVC 전략이 실린더 내 텀블 유동 및 난류 운동 에너지에 미치는 영향을 분석하는 것을 목적으로 한다. CVVD는 밸브 리프트를 고정된 상태에서 밸브 열림 기간을 독립적으로 조절할 수 있는 기술로, 엔진 효율과 성능을 향상시키는 데 유리하다.¹⁸⁾

본 연구에서는 PIV 기법을 통해 흡기 및 압축 과정에서의 유동 특성을 시각화하고, 평균 유속, 텀블 비, 난류 운동 에너지를 계산하였다. 이를 통해 밸브 닫힘 시점이 유동 특성과 연소 효율에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

2. 실험 장치 및 실험 조건

2.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 엔진은 1.6 L 가솔린 직분사 엔진을 기반으로 연구 목적에 맞게 설계된 2기통 광학 엔진으로, 주요 사양은 Table 1과 같다.

실린더는 측면 가시화를 위해 쿼츠로 제작되었으며, PIV 실험을 위한 레이저 시트가 실린더 중심부를 통해 직접 투과할 수 있도록 설계되었다. 또한, 밸브 열림 기간을 조절하기 위해 CVVD(Continuously Variable Valve

Table 1 Engine specification

Items	Specification
Engine type	Inline 2 Cylinder DOHC
Displacement	395 cc / Cyl (1.6 L 4-Cyl)
Compression ratio	13.0:1
Valvetrain	4 Valves per Cylinder Intake & Exhaust Manual CVVD
Bore x Stroke	72.0 mm x 97.0 mm
Special note	Visually accessible quartz liner

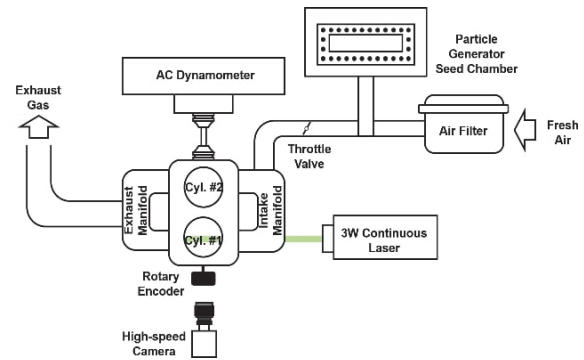


Fig. 6 Schematic diagram of engine setup

Duration) 시스템을 엔진에 적용하여 다양한 밸브 타이밍 조건에서 실험이 가능하도록 하였다. 본 연구를 위한 실험 장치 구성은 Fig. 6과 같다.

PIV 실험에 사용된 장비는 크게 레이저, 시트, 카메라로 구성된다. PIV 측정용 레이저로는 DPSS CW (Continuous wave) 레이저를 사용하였으며, 이 레이저는 532 nm의 파장대와 3 W의 출력을 가진다. 레이저 시트는 엔진 실린더 내부의 텀블 유동을 관측하기 위해 피스톤 축과 평행한 방향으로 실린더 중앙부를 통과하도록 형성하였으며, 흡기 밸브 사이와 배기 밸브 사이를 지나도록 설치하였다. 또한, 카메라는 이 레이저 시트에 수직하게 설치하여 이미지를 취득할 수 있도록 하였다. 사용된 시트 입자 크기는 10 μm 의 유리 입자로, 이를 흡기 포트에 주입하기 위해 별도의 시트 챔버를 제작하여 연결하였다. 고속 카메라로는 Phantom사의 VEO 710 L을 사용하였으며, Frame rate는 72,000 fps, 노출 시간은 4 μs , 해상도는 320 $\times$ 240으로 설정하여 이미지를 취득하였다. 피스톤이 상사점에 위치할 때는 레이저 시트가 실린더 중심부를 통과하지 못하므로, 이미지 취득은 290 ~ 70 CAD bTDC_{firing} 범위에서만 진행되었다.

2.2 데이터 결과 해석 및 후처리 과정

광학엔진에서 촬영된 PIV 이미지는 MATLAB 기반 PIVlab 소프트웨어를 활용하여 유동장데이터로 변환하였다.¹⁷⁾ 이를 통해 각 조건의 CAD에 따른 전 셀에서의 유동을 분석할 수 있었고, 평균 유속, 텀블 비, 난류 운동 에너지를 아래의 식을 이용하여 계산하고 비교 및 분석을 진행하였다.

2.2.1 평균 유속

유동장은 실린더 내 포인트 별 위치와 속도 성분을 벡터 행렬로써 저장되며, x 와 y 는 수평 및 수직 위치를, u 와 v 는 수평 및 수직 속도를 나타낸다. 평균 속도 크기는 각 셀에서 u 및 v 성분의 제곱합에 대한 제곱근을 이용하여 식 (1)에 따라 계산하였으며, 이를 바탕으로 전체 벡터 행렬의 평균 속도 크기를 산출하였다. 이러한 과정을 총 10개의 사이클에 걸쳐 반복하여 수행하여, 모든 조건에서의 10 CAD 간격 별 평균 유속이 도출되었다.

$$\text{Velocity Magnitude} = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

where u : horizontal velocity (m/s)
 v : vertical velocity (m/s)

2.2.2 텀블 비

텀블 비는 유동 속도와 반경 거리의 외적을 엔진 회전 속도로 나눈 비율로 정의되며, 이는 선행 연구에 따르면 식 (2)로 수학적으로 나타낼 수 있다.¹⁹⁾

$$\text{Tumble Ratio} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\vec{r}_{i,j} - \vec{r}_C) \times (\vec{V}_{i,j})}{\omega \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\vec{r}_{i,j} - \vec{r}_C) \cdot (\vec{r}_{i,j} - \vec{r}_C)} \quad (2)$$

where $\vec{r}_{i,j}$ = Position vector in i, j element
 $\vec{V}_{i,j}$ = Velocity vector in i, j element
 ω = engine's rotational speed
 $\vec{r}_C$ = Position vector of center

텀블 비 계산을 위해 벡터 행렬 연산을 활용하였다. 식 (2)에서 ω 는 라디안 단위의 엔진 회전 속도를 나타내고, $\vec{r}_C$ 는 행렬 내에서 선택된 셀의 위치를 의미하고, $\vec{V}_{i,j}$ 는 해당 셀에서 측정된 속도를 나타낸다. 유동의 회전 중심은 유동 모멘트 합이 가장 큰 셀의 위치로 정의하였다. 각 셀에서 거리 정보 x 와 y 및 유동 속도 u 와 v 값을 계산하여 이를 유동 모멘트로 정의할 수 있으며, 모멘트의 총합이 양수일 때 반시계 방향 회전을 나타낸다. 행렬의 모든 셀에 대해 이 과정이 반복되었으며, 이러한 정보를 바

탕으로 $\vec{r}_C$ 를 정의하였다. 텀블 비 역시 각 실험 조건마다 10개의 사이클에 걸쳐 반복 계산하였다. 이렇게 도출된 텀블 비는 다양한 실험 조건에서 비교 분석하였다.

2.2.3 난류 운동 에너지

난류 운동 에너지 계산은 식 (3)을 이용하여 진행하였다.²⁰⁾

$$\text{TKE} = \frac{1}{2} (\overline{(u')^2} + \overline{(v')^2}) \quad (3)$$

where $u' = u - \bar{u}$
 $v' = v - \bar{v}$

각 셀의 순간 속도 성분에서 전체 행렬의 평균 속도 성분을 뺀 값을 속도 성분 프라임(u' 및 v')으로 정의하였다. 여기서 평균 속도 성분($\bar{u}$, $\bar{v}$)은 실린더 내 모든 셀에서 얻은 속도 성분의 평균값으로, 기존 연구에서 난류 운동 에너지 분석 시 일반적으로 사용되는 방식이다.^{21,22)} 이후, 전체 셀에서 얻은 속도 성분 프라임의 제곱을 평균 내어 2로 나눈 값을 난류 운동 에너지로 정의하였다. 다만, 평균 속도를 전체 유동장에서 도출할 경우, 압축 말기와 같이 피스톤 속도가 '0'에 가까운 조건에서는 난류 운동 에너지가 유동의 일반적인 운동 에너지와 개념적으로 유사해질 가능성이 있다. 이에 따라, 실린더 내 벨크 유동의 Scale을 고려한 국소적 평균 속도를 활용하는 방법도 가능할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 전체 유동장에서의 난류 변동성을 정량화 하는 것이 주요 목적이므로, 기존 방식대로 전체 유동장의 평균 속도를 사용하였다. 이러한 난류 운동 에너지 계산 과정은 총 10개의 사이클에 걸쳐 반복되었으며, 각 10 CAD에 따른 평균 난류 운동 에너지가 도출되었다.

2.3 실험 조건

본 연구는 흡기 밸브 닫힘 시기가 유동 특성에 미치는 영향을 분석하기 위해, 배기 밸브의 열림 및 닫힘 시기와 흡기 밸브 열림 시기를 고정하고, 흡기 밸브 닫힘 시기를 변수로 설정하여 실험을 수행하였다. 먼저, CVVD 시스템이 구현할 수 있는 흡기 밸브 타이밍의 조정 범위를 고려하여 현실적으로 적용 가능한 범위 내에서 실험 조건을 설정하였다. 또한, 흡기 밸브 닫힘 시기가 과도하게 지연될 경우, 실린더 내 압력 상승기에 밸브가 열려 있어 실린더 내 역류가 발생할 가능성이 높아지므로, 이러한 현상을 방지하기 위해 적절한 실험 조건을 선정하였다. 더불어, 피스톤과 흡기 밸브 간의 기계적 간섭을 방지하기 위해 밸브 리프트 프로파일을 면밀히 검토하였으며,

Table 2 Experimental condition

Parameters	Values
Engine speed	1500 RPM
Engine load	WOT
EVO & EVC timing (CAD bTDC _{firing})	564 & 378
IVO timing (CAD bTDC _{firing})	363
IVC timing (CAD bTDC _{firing})	175(base), 163, 151, 130

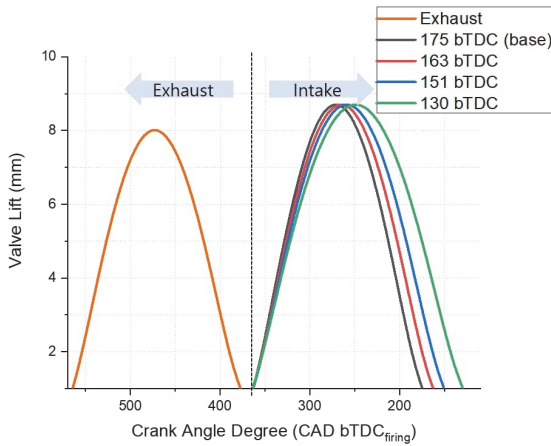


Fig. 7 Valve profile of experiment

엔진의 실제 운전 조건에서 적용 가능성을 높이기 위해 단계적으로 흡기 밸브 닫힘 시기를 변화시킨 네 가지 조건을 설정하였다. 상세한 실험 조건은 Table 2에, 각 조건의 밸브 프로파일은 Fig. 7에 제시하였다.

3. 실험 결과

본 연구의 목적은 흡기 밸브 닫힘 시기에 따른 유동 특성을 분석하는 데 있다. 이를 위해 흡기 초기 및 압축 과정에서의 평균 유속, 텀블 비, 난류 운동 에너지를 정량적으로 평가하였다. 흡기 초기 유동을 분석한 이유는, 서론에서 언급했듯이, 강한 텀블 유동이 압축 과정 말기에 더 높은 난류 운동 에너지를 유발할 수 있기 때문이다. 또한, 흡기 밸브 닫힘 타이밍의 영향이 흡기 초기 단계에서 가장 크게 나타나므로, 흡기 초기 과정에 대한 분석이 중요하다.

3.1 평균 유속

Fig. 8은 흡기 밸브 닫힘 시기에 따른 평균 유속 변화를 나타낸다. 270 ~ 240 CAD bTDC_{firing} 구간에서 모든 실험

조건에서의 평균 유속이 가장 높게 나타났으며, 이는 피스톤 속도가 최대에 도달하는 시점에서 흡기 밸브가 거의 완전히 열려 있어 실린더로 유입되는 공기의 유속이 증가했기 때문으로 분석된다. 피스톤 상단 표면에 충돌한 공기 흐름은 반시계 방향의 텀블 유동을 형성하며, 텀블 유동에 대한 구체적인 논의는 3.2절에서 다룬다.

또한, 흡기 밸브 닫힘 시기가 163 CAD bTDC_{firing}인 조건에서 전 과정에 걸쳐 평균 유속이 가장 높게 나타났으며, 흡기 밸브 닫힘 시기가 더 지연된 조건에서는 평균 유속이 감소하는 경향을 보였다. 이는 흡기 밸브 닫힘 시기가 지연될수록 흡기 밸브가 최대로 열리기까지의 시간이 증가하며, 초기 밸브 리프트 상승 속도가 느려진다. 그 결과 흡입되는 공기의 유량과 유속이 감소했기 때문으로 해석된다.

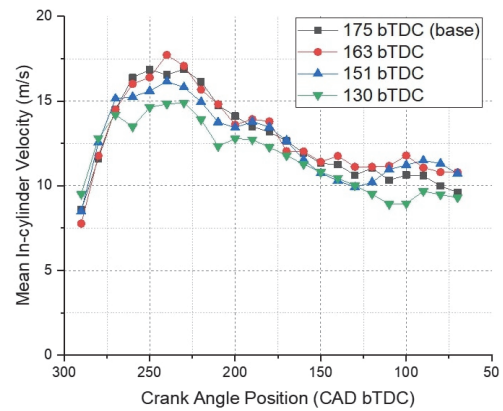


Fig. 8 Mean in-cylinder velocity under different intake valve closing timing

3.2 텀블 비

Fig. 9는 흡기 밸브 닫힘 시기가 175 CAD bTDC_{firing}인 조건에서 흡기 및 압축 과정 동안의 벡터장을 등고선으로 시각화한 결과를 보여준다. Fig. 10은 흡기 밸브 닫힘 시기에 따른 텀블 비의 변화를 나타낸다. 270 ~ 240 CAD bTDC_{firing} 구간에서 텀블 비가 가장 높았고 이후 감소하다가 피스톤이 하사점을 지나 상승하는 시점부터 다시 증가했다. 이는 텀블 유동이 주로 흡입되는 Bulk 유동에 의해 생성되며, 흡기 밸브가 닫힌 이후에는 피스톤의 영향으로 텀블 유동이 다시 강화되는 것으로 해석된다. 피스톤이 하사점을 지나 압축 과정이 시작되는 시점에서 텀블 비가 증가하는 현상이 관찰되었다. 이는 피스톤이 하사점에 도달한 이후 상향 운동을 시작함에 따라 텀블 유동이 재형성되고, 그로 인해 텀블 강도가 증가했기 때문으로 해석된다. 압축 과정 중 90 CAD bTDC_{firing} 이후 텀블 비가 다시 감소하는 것을 확인할 수 있었는데, 이는

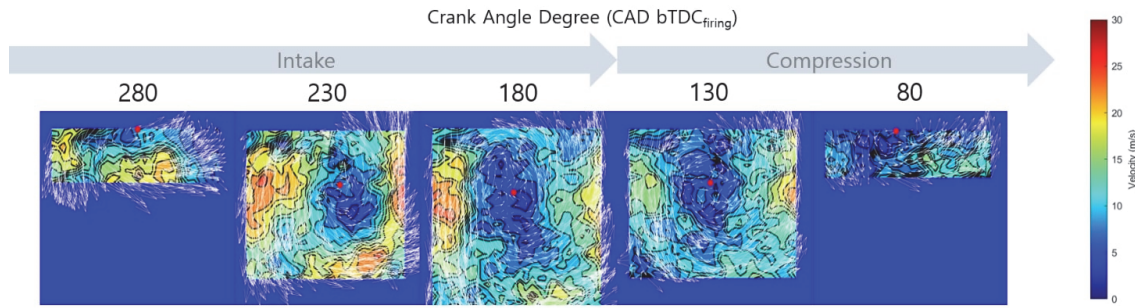


Fig. 9 Vector fields with contour map at specific CADs

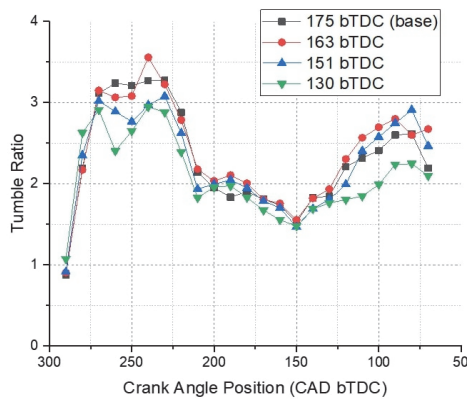


Fig. 10 Tumble ratio under different conditions

Bulk 텀블 유동이 작은 와류(Vortexes)로 분해되기 때문이다. 특히, 흡기 밸브 닫힘 시기가 130 CAD bTDC_{firing} 일 때 텀블 비가 가장 낮았다. 이는 초기 흡기 과정에서 밸브가 느리게 열려 유입되는 Bulk 유동이 줄어들고 텀블 유동 생성이 제한되기 때문으로 분석된다. 또한, 150 CAD bTDC_{firing} 이후 구간에서 130 CAD bTDC_{firing} 조건의 텀블 비가 유독 낮게 나타났는데, 이는 압축 과정 중 흡기 밸브가 열려 있어 텀블 모션을 가진 Bulk 유동이 흡기 포트 쪽으로 빠져나가기 때문으로 보인다. 90 CAD bTDC_{firing} 부근에서 텀블 비가 다시 감소하는 경향이 관찰되었다. 이는 압축 과정에서 Bulk 유동이 붕괴되며 난류 유동이 생성되는 현상으로 해석될 수 있다. 이에 대한 구체적인 논의는 3.3절에서 다룬다.

3.3 난류 운동 에너지

Fig. 11은 흡기 밸브 닫힘 시기에 따른 난류 운동 에너지의 변화를 나타낸다.

난류 운동 에너지는 평균 유속이 가장 높은 270 ~ 240 CAD bTDC_{firing} 구간에서 가장 큰 값을 나타냈다. 이는 흡기 과정 초기에 흡입된 공기의 고속 유동에 의해 실린더 내부의 운동 에너지가 급격히 상승하며, 이에 따라 난류

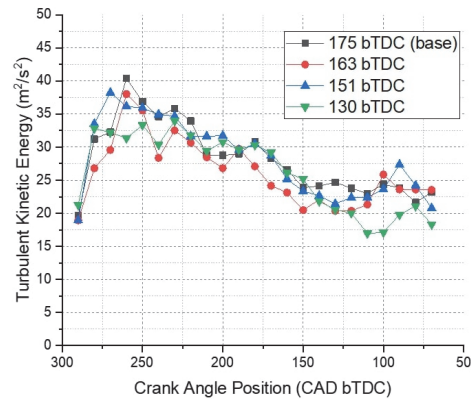


Fig. 11 Turbulent Kinetic Energy under different conditions

운동 에너지도 동시에 증가했기 때문으로 해석된다. 이후 흡기 밸브가 점차 닫히고 피스톤의 상향 운동이 시작됨에 따라 유속이 감소하게 되고, 이에 따라 난류 운동 에너지도 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 흡기 과정 초기에 생성된 높은 유동 에너지가 압축 과정이 진행됨에 따라 점차 소산되기 때문으로 이해할 수 있다. 한편, 90 CAD bTDC_{firing} 부근에서 텀블 비가 감소하는 현상이 관찰되었으며, 이는 압축 과정 중에 Bulk 유동이 붕괴되고 난류가 더욱 활성화되면서 발생한 것으로 분석된다. 이와 동시에, 난류 운동 에너지가 동일한 시점에서 다시 상승하는 현상을 통해, 텀블 유동의 붕괴와 난류 생성 간의 밀접한 연관성을 확인할 수 있었다. 특히, 텀블 유동의 붕괴는 고속 유동과 저속 유동 간의 혼합을 촉진하고, 이에 따라 난류 유동이 강화되며 난류 운동 에너지가 증가하는 결과를 초래한다. 70 CAD bTDC_{firing} 시점을 기준으로, 163 CAD bTDC_{firing} 조건에서 가장 높은 난류 운동 에너지가 측정되었으며, 반대로 130 CAD bTDC_{firing} 조건에서는 가장 낮은 난류 운동 에너지가 확인되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 흡기 밸브 닫힘 시기의 지각 정도에 따라 실린더 내부 유동의 변화를 분석하기 위해 가시화 실험이 가능한 가솔린 직분사 광학 엔진을 이용하여 광학 실험을 수행하였다. CVVD 시스템을 도입해 다양한 밸브 제어 전략을 구현하였으며, 실린더 내부 유동 분석을 위해 PIV 기법을 활용하였다. 10 CAD 간격으로 각 평균 유속, 텀블 비, 난류 운동 에너지를 계산하고, 등고선 형식의 유동장을 도출하기 위해 취득된 이미지를 후처리하였다. 이를 통해 흡기 및 압축 과정에서의 유동 특성을 정량적으로 평가하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 270 ~ 240 CAD $bTDC_{firing}$ 구간에서 모든 실험 조건에서 평균 유속이 가장 높게 나타났으며, 이는 피스톤의 속도가 최대에 도달하는 시점에서 흡기 밸브가 거의 완전히 열려 유입되는 공기의 유속이 증가하기 때문으로 해석된다.
- 2) 흡기 밸브 닫힘 시기가 163 CAD $bTDC_{firing}$ 인 조건에서 전 과정에 걸쳐 평균 유속이 가장 높았고, 흡기 밸브 닫힘 시기가 지연될수록 평균 유속이 감소하는 경향을 보였다.
- 3) 텀블 비는 270 ~ 240 CAD $bTDC_{firing}$ 구간에서 가장 높았고, 이후 감소하다가 피스톤이 하사점을 지나 상승하는 시점부터 다시 증가하였다. 텀블 유동은 흡기 과정 초기의 고속 유동에 의해 생성되며, 피스톤의 상향 운동에 따라 다시 강화되는 것으로 분석된다.
- 4) 90 CAD $bTDC_{firing}$ 부근에서 텀블 비의 감소가 관찰되었고, 이는 압축 과정 중에 Bulk 유동이 붕괴되면서 난류가 활성화되는 현상으로 해석되었다.
- 5) 난류 운동 에너지는 평균 유속이 가장 높았던 270 ~ 240 CAD $bTDC_{firing}$ 구간에서 가장 큰 값을 보였으며, 이는 흡기 과정 초기에 흡입된 고속 유동에 의해 실린더 내부 운동 에너지가 급격히 상승하고, 그로 인해 난류 운동 에너지가 증가했기 때문이다.
- 6) 70 CAD $bTDC_{firing}$ 을 기준으로, 163 CAD $bTDC_{firing}$ 조건에서 가장 높은 난류 운동 에너지가 측정되었으며, 반대로 130 CAD $bTDC_{firing}$ 조건에서 가장 낮은 값을 보였다.

후 기

본 연구는 현대자동차와의 산학과제인 ‘초고효율 엔진 연소 개발 및 LES 결과 검증을 위한 광학 엔진 연구’의 일환으로 현대자동차의 지원과 산업통상자원부 산업기술진흥원[친환경자동차(xEV) 부품개발 R&D 전문인력양성, P0017120]의 지원 하에 수행되었습니다. 이에 깊이 감사드립니다.

References

- 1) The Korea Economic Daily, Hyundai Motor Cuts 2030 Sales Goals as EV Chasm Likely Protracted, <https://www.kedglobal.com/corporate-strategy/news/View/ked202409190012>, 2024.
- 2) The Korea Herald, Hyundai Motor Braces for Trump 2.0 with Hybrid Push, <https://news.koreaherald.com/view.php?ud=20241129050056>, 2024.
- 3) Precedence Research, Hybrid Electric Vehicle Market Size, Share, and Trends 2024 to 2034, <https://www.precedenceresearch.com/hybrid-electric-vehicle-market>, 2023.
- 4) I. C. Chung, M. K. Kim, H. H. Kang, J. I. Park and J. H. Lee, “Fuel Economy Analysis of Hybrid Electric Vehicles in On-Road Driving Condition,” Transactions of KSAE, Vol.25, No.4, pp.408-414, 2017.
- 5) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, New York, McGraw-Hill, 1988.
- 6) T. Li, Y. Gao, J. Wang and Z. Chen, “The Miller Cycle Effects on Improvement of Fuel Economy in a Highly Boosted, High Compression Ratio, Direct-Injection Gasoline Engine: EIVC vs. LIVC,” Energy Conversion and Management, Vol.79, pp.59-65, 2014.
- 7) M. Scheidt, C. Brands, M. Kratzsch and M. Günther, “Combined Miller/Atkinson Strategy for Future Downsizing Concepts,” MTZ Worldwide, Vol.75, No.5, pp.4-11, 2014.
- 8) M. Braun, M. Klaas and W. Schoröder, “Influence of Miller Cycles on Engine Air Flow,” SAE International Journal of Engines, Vol.11, No.2, pp.161-178, 2018.
- 9) Y. Li, H. Zhao, B. Leach, T. Ma and N. Ladommatos, “Characterization of an In-Cylinder Flow Structure in a High-Tumble Spark Ignition Engine,” International Journal of Engine Research, Vol.5, No.5, pp.375-400, 2004.
- 10) D. Heim and J. Ghandhi, “A Detailed Study of In-Cylinder Flow and Turbulence Using PIV,” SAE International Journal of Engines, Vol.4, No.1, pp.1642-1668, 2011.
- 11) J. Y. Jung, S. J. Park and C. S. Bae, “Combustion and Emission Characteristics of n-Butane with Enhanced Tumble Flow Under Lean Stratified Conditions,” Transactions of KSAE, Vol.27, No.5, pp.361-368, 2019.
- 12) R. B. R. da Costa, R. M. Braga, C. A. Gomes Júnior, R. M. Valle and R. Huebner, “PIV Measurements and Numerical Analysis of In-Cylinder

- Tumble Flow in a Motored Engine,” Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol.39, pp.3931-3945, 2017.
- 13) B. Murali Krishna and J. M. Mallikarjuna, “Effect of Engine Speed on In-Cylinder Tumble Flows in a Motored Internal Combustion Engine - An Experimental Investigation Using Particle Image Velocimetry,” Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol.4, No.1, pp.1-14, 2012.
 - 14) Y. Li, H. Zhao, Z. Peng and N. Ladommatos, “Particle Image Velocimetry Measurement of In-Cylinder Flow in Internal Combustion Engines - Experiment and Flow Structure Analysis,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol.216, No.1, pp.65-81, 2002.
 - 15) I. Bücker, D. -C. Karhoff, M. Klaas and W. Schröder, “Stereoscopic Multi-Planar PIV Measurements of In-Cylinder Tumbling Flow,” Experimental Fluids, Vol.53, pp.1993-2009, 2012.
 - 16) P. Stansfield, G. Wigley, T. Justham, J. Catto and G. Pitcher, “PIV Analysis of In-Cylinder Flow Structures Over a Range of Realistic Engine Speeds,” Experimental Fluids, Vol.43, pp.135-146, 2007.
 - 17) Hyundai Media Center, Hyundai Motor Group Unveils World’s First CVVD Engine Technology with Improved Performance and Less Emissions, <https://www.hyundainews.com/en-us/releases/2808>, 2019.
 - 18) W. Thielicke and E. J. Stamhuis, “PIVlab - Towards User-Friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB,” Journal of Open Research Software, Vol.2, No.1, Paper No.30, 2014.
 - 19) V. Salazar and S. Kaiser, “Interaction of Intake-Induced Flow and Injection Jet in a Direct-Injection Hydrogen-Fueled Engine Measured by PIV,” SAE 2011-01-0673, 2011.
 - 20) S. B. Pope, Turbulent Flows, Cambridge, Cambridge University Press, 2000.
 - 21) D. Kim, J. Shin, Y. Son and S. Park, “Characteristics of In-Cylinder Flow and Mixture Formation in a High-Pressure Spray-Guided Gasoline Direct-Injection Optically Accessible Engine Using PIV Measurements and CFD,” Energy Conversion and Management, Vol.248, Paper No.114819, 2021.
 - 22) R. J. Tabaczynski, “Turbulence and Turbulent Combustion in Spark-Ignition Engines,” Energy and Combustion Science, Pergamon, pp.259-281, 1979.