

밀러사이클 적용 HEV 엔진 실린더의 가변흡기밸브 닫힘각에 따른 실린더내 유동해석

김상명* · 성기수* · 이진욱**†

Analysis of In-cylinder Flow in a Miller Cycle Engine with Variable IVC for HEV

Sangmyeong Kim, Gisu Sung and Jinwook Lee

Key Words: Miller cycle(밀러 사이클), Atkinson cycle(앳킨슨 사이클), In-cylinder flow(실린더 내 유동), Variable valve timing(가변밸브 개폐시기), Intake valve closing angle(흡기밸브 닫힘각), ANSYS simulation(ANSYS 해석), Moving mesh(이동 격자)

Abstract

For reduction of CO₂ emission emitted from combustion engine, the developed nations have been focused on R&D of hybrid electric vehicle. Further more, many automobile companies are researching on various techniques related to engine used in HEV to enhance fuel economy. One of key techniques is miller cycle that control a valve timing to reduce compression stroke for saving energy and increase expansion stroke for high power. In this study, it was investigated the in-cylinder flow characteristics of miller cycle with variable intake valve timing by using the ANSYS simulation code. For simulation, the key analytic parameter defined as intake valve closing timing and cam profile. As main results, it was shown that LIVC cause a lower pressure inside cylinder and had better control turbulence intensity.

1. 서 론

최근 자동차 기술 트렌드는 불안정한 고유가와 강화되는 CO₂포함 유해 배출가스 규제에 의해 친환경, 저연비 차량 위주로 진행되고 있다. 따라서 우리나라를 비롯한 다양한 선진국은 친환경자동차, 대체연료자동차, 하이브리드 자동차 등 다양한 차량에 대한 연구 개발을

가속화하고 있는 실정이다⁽¹⁾.

특히 현재 상황을 극복하기 위한 기술 중 상용화에 가장 빠르게 성공하고 있는 기술은 하이브리드 자동차 관련 기술이며, 현재 국내에서 이에 대한 R&D에 박차를 가하고 있다⁽²⁾.

차량의 효율을 향상시키기 위해 하이브리드 차량에 다양한 기술이 현재 적용되고 있다. 주 동력원인 엔진의 경우, 밸브타이밍에 변화를 주어 압축비보다 팽창비를 크게 하는 앳킨슨사이클(Atkinson cycle) 혹은 밀러사이클(Miller cycle)을 대부분의 HEV엔진에 적용하고 있으며 Fig. 1은 밀러사이클의 P-V선도를 나타낸 것이다. 이에 대한 효율 극대화를 위해서는 밸브타이밍의 변화로 압축과정을 줄임으로써 유효압축비를 감소하여 상대적으로 팽창비를 크게 해야 한다.

(Received: 16 February 2014, Received in revised form: 09 March 2014, Accepted: 10 March 2014)
*숭실대학교 대학원 기계공학과
**숭실대학교 기계공학과
†책임저자, 종신회원, 한국역체미립화학회
E-mail : immanuel@ssu.ac.kr
TEL : (02) 820-0929

이러한 밀러사이클 기관을 실현하기 위한 방법은 크게 Fig. 2와 같이 밸브 타이밍을 조절하는 EIVC(early intake valve closing) 방식과 LIVC(late intake valve closing) 방식으로 나눌 수 있다⁽³⁾.

EIVC 방식은 하사점 이전(BBDC)에 밸브가 닫혀 흡입공기의 압력이 낮아 냉각효과로 노킹은 감소하나, 흡입밸브 개방시간이 짧아 고회전 영역에서 충분한 공기가 공급되지 않아 토크가 감소하는 문제가 있다⁽⁴⁾.

반면, LIVC 방식은 하사점 이후(ABDC)에 밸브가 닫혀 실린더 주변의 열을 흡수하여 고온 상태로 되돌아간다. 이로 인해 충전효율이 감소하지만 공기온도는 크게 낮추지 않는다⁽⁴⁾. 흡입 밸브타이밍을 진각 혹은 지각시키면 유효 흡입공기량이 감소하여 실린더 내부의 혼합공기를 압축할 때 압축행정이 작아져 유효압축비가 낮아진다. 하지만 팽창행정의 경우, 기존의 팽창과정을 이용하여 팽창비는 압축비보다 크게 되는 원리이다. 이 사이클을 사용하기 위해 압축과정의 흡입공기의 감소를 보상하기 위한 과급기가 필요하다. 과급을 이용하여 밀러사이클을 구현하여 배기특성의 악화 없이 NOx와 soot 저감을 달성할 수 있는 내용의 기존 연구보고가 있다⁽⁵⁾.

현재 상용 하이브리드 차량을 분석한 결과⁽⁶⁾, 현재 EIVC 방식보다는 LIVC 방식이 적용되고 있으므로, 본 연구에서는 LIVC 방식에 대한 연구를 수행하였다.

따라서 본 연구에서는 하이브리드자동차 전용 엔진에 적용되는 밀러사이클 기반 예혼합 공기-연료 유동장 분석을 위한 3차원 동적 해석모델과 실린더 형상을 모델링한 후, 밸브 타이밍의 닫힘 각에 따른 엔진 실린더 내부 공기-연료 유동 특성에 대해 분석하였다. 더불어서 본 연구에서는 흡입되는 공기에 대한 연료의 미립화는 충분히 이루어진 예혼합기에 대한 초기 유동 물성치를 적용함으로써 이에 대한 과급이나 밸브 타이밍의 영향을 최소화하였다.

2. 밀러사이클용 3차원 해석 모델링 및 해석조건

2.1 ANSYS를 이용한 3D 해석 모델링

본 연구에서는 밀러사이클의 기본적인 작동성능 해석을 수치적으로 검증하기 위하여, 신뢰성이 검증된 상용 ANSYS 14.0의 ICE를 사용하여 엔진 실린더의 3차원

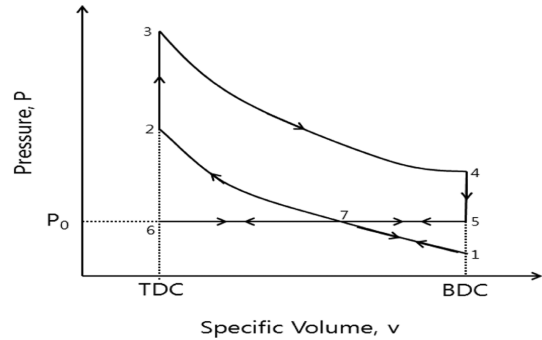


Fig. 1 P-V diagram of miller cycle

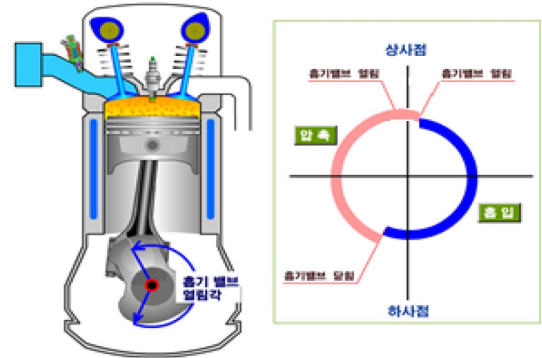


Fig. 2 General open & closing timing of the intake valve at miller cycle engine

형상 모델링 작업을 진행한 후, 유동 수치해석을 진행하였다. ICE는 Fluent 기반 톨로 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 식을 풀어 유동장을 해석할 수 있는 해석프로그램으로 해석에 관련된 식^(7,8)을 아래에 제시하였는데, 본 연구에서는 하이브리드 엔진용 실린더 내부 유동 해석에 적합한 것으로 판단하였다.

- 연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

- 운동방정식

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + u_j \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \overline{\rho u_i u_j} \right]$$

- 난류에너지 및 소산율 난류모델

$$\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad \mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}$$

- Standard k-ε모델의 수송방정식

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \rho P - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right]$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = C_{\varepsilon_1} \frac{\rho P}{k} - C_{\varepsilon_2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right]$$

$$P = \frac{\mu_i}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} k \frac{\partial u_m}{\partial x_m}$$

- Standard k-ε방정식의 경계조건

$$k = 1.5(I \times U)^2, \varepsilon = \frac{C_\mu^{0.75} k^{1.5}}{L}$$

$I = 2\%, L = 0.027 \text{ m}, C_\mu = 0.09, C_{\varepsilon_1} = 1.44$

$C_{\varepsilon_2} = 1.92, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3$

본 연구에 사용된 모델의 제원은 Table 1과 같고 모델 형상은 Fig. 3에 나타내었다.

해석 격자는 ICEM CFD 14.0을 사용하여 Fig. 4와 같은 실린더 헤드 형상에 따라 제작하였으며 약 21만개 노드와 약 73만개의 요소로 구성하였다. 그리고 흡배기

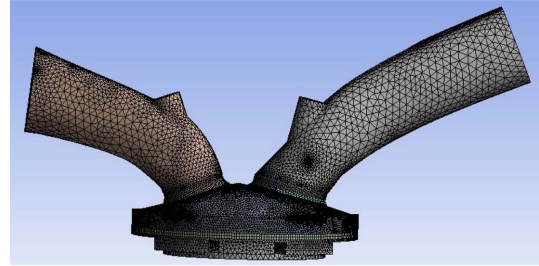


Fig. 4 Meshes generation for single cylinder

밸브의 움직임에 따른 실린더의 움직임을 구현하기 위하여 Fluent가 제공하는 격자를 늘리거나 줄일 수 있는 Dynamic Mech 기능을 사용하였다. Quadrilateral 및 Hexahedron 형태의 격자는 Triangle 및 Tetrahedron 형태의 격자보다 더 적은 격자수로도 더 정확한 해를 구할 수 있는 장점이 있으며 유동방향에 대해 수치에러를 감소시킬 수 있기 때문에⁽⁷⁾ 유동방향으로 격자가 정렬되어 있는 밸브 시트 부분과 실린더 Dynamic mesh가 생성되는 연소실 내부 형상은 Quadrilateral 및 Hexahedron 형태의 격자를 사용하여 생성하였다. 그 외의 복잡한 형상은 해석의 정확도를 높이기 위해 Triangle 및 Tetrahedron 형태의 격자를 생성하여 해석을 진행하였다.

Table 1 Specification of Single cylinder engine

파라미터	값
보어 × 행정 (mm)	84 × 90
실린더 당 밸브 수	4 (2 intakes V/V 2 exhaust V/V)
엔진 회전속도 (rpm)	2000
배기량 (cc)	499
흡기밸브 타이밍 (°)	IVO @ 41° BTDC IVC @ 37° ABDC
배기밸브 타이밍 (°)	EVO @ 35° BBDC EVC @ 58° ATDC

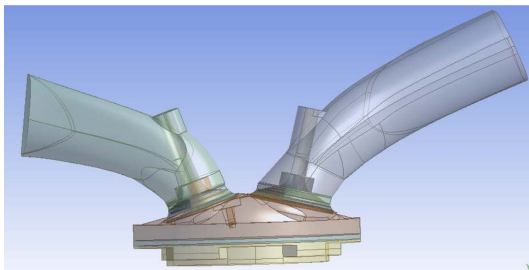


Fig. 3 Single cylinder model with moving mesh

2.2 해석 조건

본 해석에 사용된 경계 조건은 먼저 흡배기 입구에서 대기압의 정압조건을 주었고, 대칭성을 고려하여 단면 방향의 대칭 조건을 설정하였다. 난류모델은 압축성, 부력, 연소 해석에 사용되는 k-ε standard model을 사용하였다. 전체 해석 행정은 크랭크 각도 720°에 따른 4사이클 방식으로 수행하였다. Fig. 5는 흡기 및 배기 밸브의 양정(lift) 프로파일(profile)을 나타낸 것으로써, 지정된

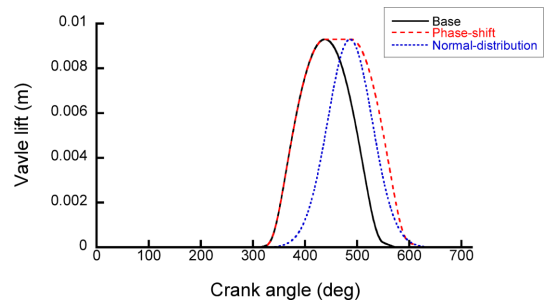


Fig. 5 Intake valve profile

Table 2 Numerical analysis conditions

해석 변수	해석 조건	
흡입 압력 (bar)	1 (natural aspiration)	
IVC 밸브 시기	Base	37° ABDC
	Phase-shift	87° BBDC
	Normal distribution	87° ABDC

각도에 따라 흡기 밸브와 배기밸브가 연속적으로 작동하게 되어, 실린더 체적의 격자가 움직이면서 해석이 가능하도록 모델을 구성하였다.

본 연구에서는 기존 밸브 타이밍과 흡기 밸브 타이밍을 지각하는 것을 해석 변수로 선정하였고 Table 2에 변수를 나타내었다. 지각된(LIVC) 흡기 밸브 타이밍은 상용 하이브리드차량의 흡기 가변 밸브 범위를 참고하여 선정하였다⁽⁶⁾. 지각된 흡기 밸브 타이밍은 밸브 리프트가 최대로 열려있는 시기를 50도를 유지하여 지각한 경우의 밸브 타이밍(Phase-shift)과 밸브 리프트의 최대 높이를 유지하고 캠의 형상이 정규분포를 따르는 형상의 지각된 흡기 밸브 타이밍(Noraml-distribution)을 선정하여 해석을 진행하였다. 해석에 사용된 밸브 타이밍은 Fig 5에 별도 점선으로 나타내었다.

이를 통해 얻어진 해석 데이터로부터 HEV엔진용 밀러사이클에 대한 예혼합 유동 동특성을 다음과 같은 주요 항목별로 분석하였다. 하이브리드 엔진의 주 작동 구간에 해당되는 엔진 회전수를 대상으로 해석을 수행하였고, X축에 대한 텀블비와 스웰비 및 실린더 종단면과 횡단면의 형상을 확인하여 실린더 내부의 유동해석을 진행하였다. 여기서 스웰유동은 실린더 내에서 발생하는 대규모 질량의 회전 운동이며, 흡기가 실린더로 들어올 때, 흡기 유동에 접선 성분을 부여하여 흡기계를 구성할 경우, 주로 발생한다. 이에 직교하는 회전유동인 텀블은 성층 연소로 작동되는 기간의 공기 연료 혼합기의 성층화를 이루는데 중요한 변수이기 때문에 텀블유동을 분석하는 것 또한 매우 중요하다⁽⁹⁾. 본 해석에 사용된 스웰비와 텀블비의 정의는 다음과 같다⁽⁷⁾.

$$Swirl\ ratio = \frac{L \cdot sa / I_{sa}}{(EngineRPM \times 2\pi) / 60}$$

$$Tumble\ ratio = \frac{L \cdot tx / I_{tx}}{(EngineRPM \times 2\pi) / 60}$$

CA = 크랭크 각

L = 유체 질량의 각운동량 벡터

\vec{sa} = Swirl축

\vec{tx} = Tumble X축

I_{sa} = Swirl 축의 유체 질량의 관성 모멘트

I_{tx} = Tumble X축의 유체 질량의 관성 모멘트

따라서 본 연구에서는 위와 같은 유동 해석 결과값을 통해 흡입압력 및 흡기 밸브의 닫힘각 프로파일 시기의 변화에 따른 실린더 내부의 유동장에서의 특성들을 중점적으로 분석하였다.

3. 해석 결과

3.1 밸브 타이밍에 따른 종단면의 영향 비교

Figure 6은 720° 행정 과정에서, 3가지 조건에 대한 X축에 대한 텀블비를 나타낸 것이다. 기존 밸브 프로파일을 가진 경우와 흡기 밸브 닫힘 시기를 50° 지각한 두 경우의 초기 텀블비 변화는 비슷한 변화 패턴을 보이고 있다. 그러나 흡기 밸브가 열리는 BTDC 40° 지점의 경우, 밸브 타이밍이 유사한 Base 타입과 Phase-shift 타입은 비슷한 패턴을 보였지만, 밸브가 닫히는 시점인 ABDC 40° 지점에서 텀블비의 변화를 관찰할 수 있었다. 유동장에서 발생한 차이점은 흡입되는 공기의 양이 증가하고, 흡기밸브가 압축행정에서 긴 시간 열려 발생하는 역류되는 공기의 영향에 의해 발생하는 것으로 해석된다. 이에 대한 영향으로Phase-shift의 텀블비는 Base에 비해 텀블유동이 강화되는 것으로 판단된다. Normal-distribution 타입은 위의 두 경우와 달리, 밸브가 열린

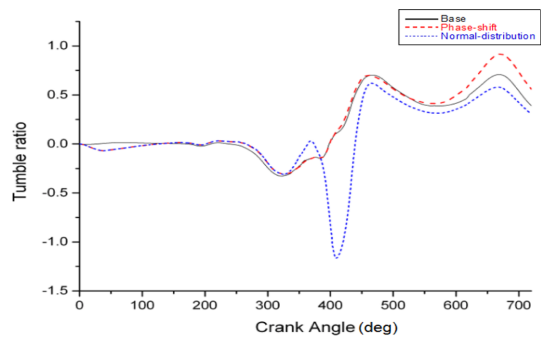


Fig. 6 Comparison of tumble ratio

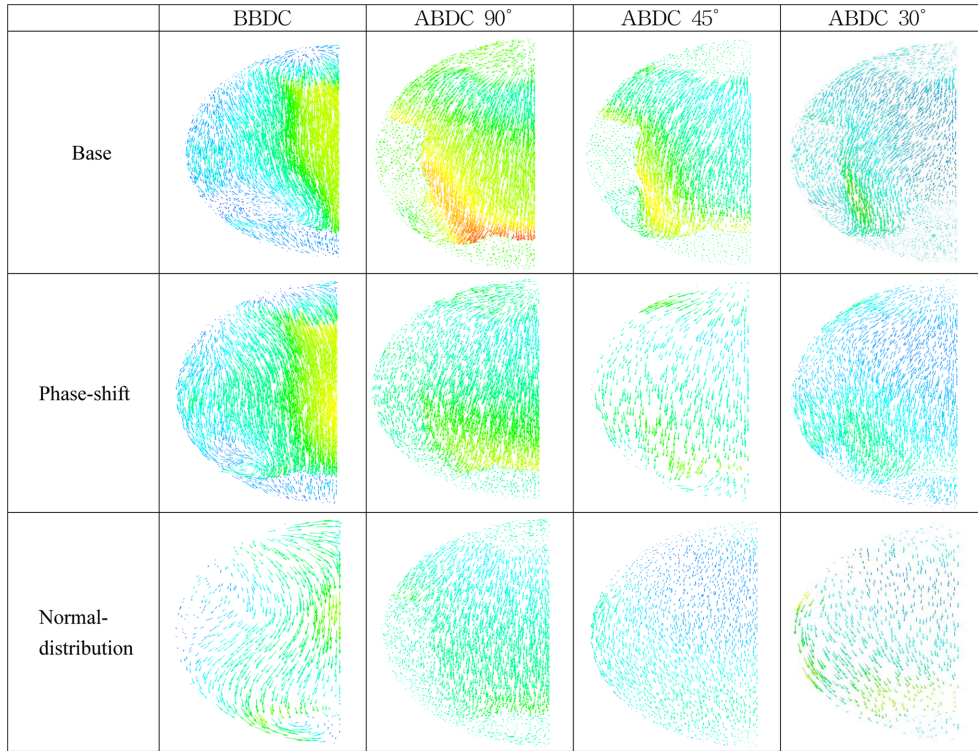


Fig. 7 Comparison of XZ-plane velocity vector

이후 텀블비가 변동하는 것을 확인하였다. Normal-distribution 타입의 텀블비 변동은 Base와 Phase-shift에 비해 급격한 흡기 밸브 형상을 가지므로 텀블비의 변동이 상대적으로 심한 것으로 판단된다. 이에 따라 다른 두 경우에 비해 낮은 텀블비를 가짐을 알 수 있었다.

Figure 7은 3가지 조건에 대한 XZ 평면의 속도벡터를 BBDC, ABDC 90°, ABDC 45° 및 ABDC 30°에 대해 나타낸 것이다. 흡기 밸브의 단형의 영향을 분석하기 위해 BBDC 지점 이후를 중점적으로 살펴보았다. Base 및 Phase-shift 타입의 경우, 속도값의 차이는 있지만 속도의 방향 및 유동은 비슷한 경향을 보이며, 이는 앞서 텀블비의 값에서 확인한 것과 같은 경향인 것을 확인할 수 있다. Normal-distribution 타입의 경우, 다른 두 가지 경우와는 유동장의 차이가 나타남을 알 수 있다. Normal-distribution 타입의 경우, BBDC 이후 두 가지 경우와 달리 유동장이 단조로움을 알 수 있는데 이는 텀블비가 상대적으로 작은 것을 나타냄을 알 수 있었다.

3.2 밸브 타이밍에 따른 횡단면의 영향 비교

Figure 8은 720° 행정 과정에서, 3가지 조건에 대한 스

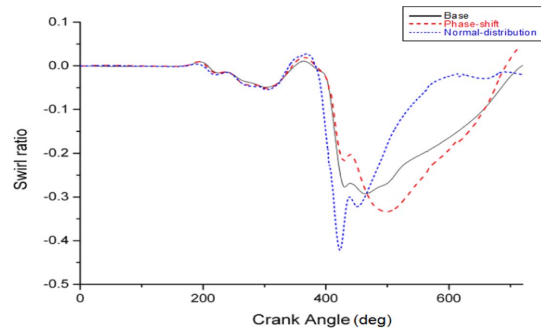


Fig. 8 Comparison of swirl ratio

윙비 변화를 나타낸 것이다. 기존 밸브 프로파일을 가진 경우와 흡기 밸브 단형 시기를 50° 지각한 경우의 초기 스윙비 변화는 비슷한 변화 패턴을 보이고 있으나, TDC 이후 3가지 조건에서 차이가 발생했다. 밸브 타이밍이 유사한 Base 타입과 Phase-shift 타입은 밸브 리프트가 최대로 열리는 부분까지는 같은 패턴을 보이나, Phase-shift의 최대 리프트 기간이 증가하여 공기의 유입량이 많아져 스윙비가 기존보다 증가함을 알 수 있었다.

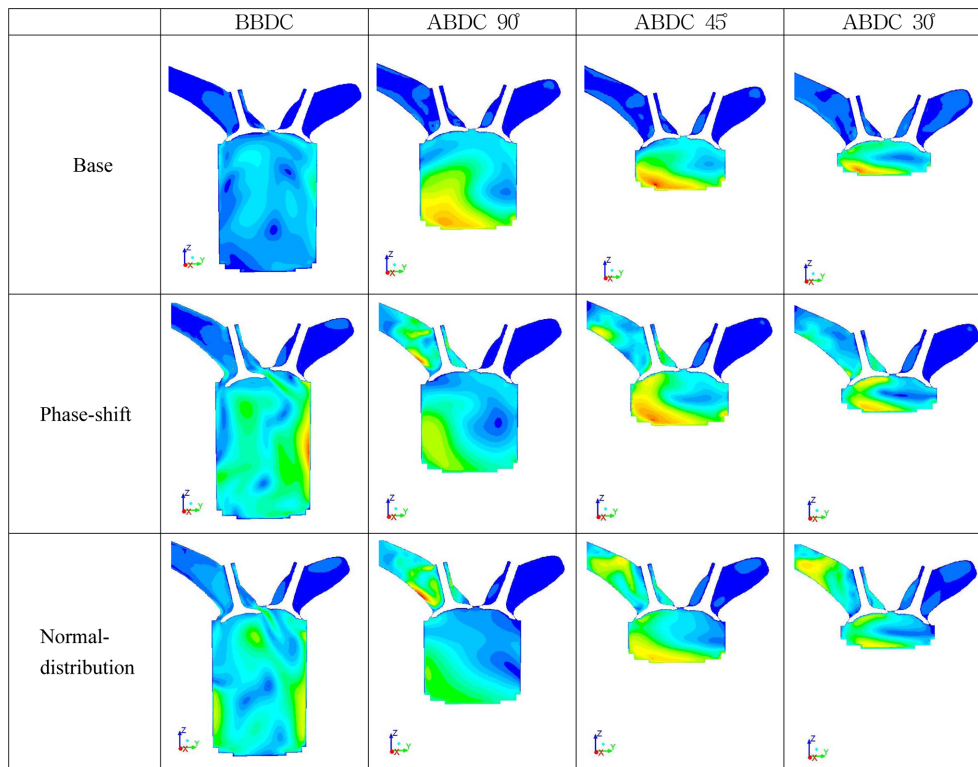


Fig. 9 Comparison of YZ-plane velocity contour

Normal-distribution 타입의 경우 두 조건에 비해 빠른 스윙비 변화 패턴을 보이고 있다. 이는 밸브 초기 형상에 따른 영향으로, 초기에 빠른 혼합을 보이나 이후에 더 낮은 혼합을 보이고 있으며 텀블비의 경우와 비슷한 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 또한 BBDC 이후, Normal-distribution 타입의 형상에 의한 급격한 속도 변화가 발생하여 압축행정에서 실린더의 점성에 의한 저항 때문에 스윙유동이 감소함을 알 수 있었다.

Figure 9는 세 가지 조건에서 실린더 횡단면 YZ 평면의 속도장을 비교해서 나타낸 것이다. BBDC의 경우, Base 타입은 흡기 밸브가 거의 닫혀있는 있지만, Phase-shift와 Normal-distribution의 경우는 50° 지각하여 BBDC 이후에 흡기 밸브가 열려있는 것을 확인하였다. 이로 인해 흡입구의 공기의 유동이 기존 조건과 달리, 흡입되는 형상을 그림으로 확인하였다. 흡기 밸브가 모두 닫힌 ABDC 90°의 경우, Base 조건과 달리 두 조건은 흡기관에서 역류현상이 발생하는 것을 알 수 있었고 이로 인해 역류가 증가하여 체적효율이 감소하게 되는 것으로 판단된다.

3.3 밸브 타이밍에 따른 유동장의 영향 비교

Table 3은 세 가지 조건에서 BTDC 20°인 경우, 실린더 내부 횡단면에서 유동장에 대한 결과값을 나타낸 것으로서, 압력, 밀도, 속도 및 난류강도(turbulence intensity)에 대한 영향을 살펴보았다. 압력과 밀도의 경우, 흡기 밸브 닫힘을 지각한 두 경우가 Base 조건에 비해 낮음을 알 수 있었다. 이는 압축 행정 동안에 흡기 밸브가 열려있기 때문에 압력과 밀도가 낮아지는 것으로 판단된다. 밀도의 경우, Phase-shift와 Normal-distribution의 차이가 발생하였다. 이는 Phase-shift의 경우가 흡기 밸브의 열린 양이 상대적으로 많기 때문인 것으로 분석하

Table 3 Effect on valve timing at BTDC 20°

	Base	Phase	Normal
압력 (kPa)	780	670	672
밀도 (kg/m ³)	5.376	4.886	4.842
속도 (m/s)	4.45	5.36	4.21
난류강도 (%)	280	310	373

Table 4 Effect on valve timing at TDC

	Base	Phase	Normal
압력 (kPa)	995	859	860
밀도 (kg/m ³)	6.339	5.761	5.712
속도 (m/s)	2.21	3.07	2.07
난류강도 (%)	250	291	347

였다. 난류강도의 경우, 흡기 밸브의 닫힘각을 지각한 경우가 기존의 난류강도보다 높은 것을 확인하였다. 이는 기존의 경우보다 많은 공기가 흡입된 후, 압축 행정에서 흡입된 공기가 역류하여 공기 유동이 복잡하게 되어 난류강도가 높아진 것으로 판단된다. Phase-shift와 Normal-distribution의 난류강도의 차이가 발생한 것을 확인 할 수 있었다. 이는 난류강도가 평균속도에 반비례하기 때문에, Phase-shift의 경우 더 높은 속도를 나타내는 반면 난류강도는 상대적으로 낮음을 알 수 있었다.

Table 4는 세 가지 조건에서 TDC인 경우, 실린더 내부 횡단면에서 유동장에 대한 분석결과이다. 분석 결과, BTDC 20°와 비슷한 경향을 나타내나, BTDC 20°보다 상대적으로 압축 행정이 진행되어 압력 및 밀도가 증가함을 알 수 있었다. 속도장의 경우, BTDC 20°보다 상대적으로 감소하는 경향을 보였다. 이는 실린더 내부 압력이 증가하여 내부 유동이 감소한 것으로 판단된다. 난류강도의 경우, 기존 조건에 비해 흡기 밸브 닫힘을 지각한 경우의 난류강도가 증가하며, Phase-shift와 Normal-distribution의 난류강도도 앞서 분석한 경향과 유사함을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 하이브리드 차량에 적용되는 저압축 고폰창 밀러사이클의 해석모델을 구현한 후, 흡기 밸브 닫힘각의 타이밍을 지각한 것과 정규분포를 따르는 캠 형상에 따른 실린더 내부 유동장 특성을 비교 분석한 것으로써, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 텀블비의 비교 결과, 비슷한 밸브 프로파일을 가지는 Base 타입과 Phase-shift 타입의 경우, 초기 텀블비의 유사한 경향을 보이나, 흡기 밸브 닫힌 이후에 차이가 발생함을 알 수 있었다. 하지만 정규분포 형태를 가지는 Normal-distribution 타입은 위의 두 경우와 다른 형상을

가져 흡기 밸브가 열린 이후 급격한 텀블비 증가를 보이며 흡기 밸브가 닫힌 이후 두 경우에 비해 더 낮은 텀블비를 가짐을 알 수 있었고 XZ 평면의 속도벡터를 살펴본 결과 텀블비의 경향과 유사한 패턴을 가짐을 알 수 있었다.

2) 스월비의 비교 결과, 3가지 조건에서 TDC 이후 다른 스월비 패턴을 가짐을 알 수 있었다. Normal-distribution 조건의 경우, 밸브 프로파일 형상의 영향이 가장 컸으며, Base 타입과 Phase-shift 타입은 흡기 밸브 닫힘 시기의 차이에 따른 영향으로 보인다. 실린더 내부 횡단면에서는 BBDC 이후 Base 타입을 제외한 두 경우 흡기 부분에서 더 많은 양의 공기가 유입되는 것을 확인하였으나, 이후 흡기 부분에서 역류가 발생함을 알 수 있었다.

3) BTDC 20°와 TDC 지점에서 실린더 내부에서는 Base 경우보다 흡기 밸브 닫힘을 지각한 경우, 실린더 압력 및 혼합기 밀도는 낮아지지만 난류강도의 값은 증가하기에 초기 화염생성에 유리할 것으로 판단된다. Normal-distribution 타입에 비해 Phase-shift 타입이 텀블비와 스월비 측면에서 더 좋은 혼합을 형성하므로 세 가지 조건 중에서 최적 시기로 판단된다.

후 기

본 연구는 2013년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 지식경제 기술혁신사업 지원을 받아 수행된 것이며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) T. Ueda, A. Ohata, "Trends of Future Power-train Development and the Evolution of Power-train Control Systems", SAE 2004-21-0063.
- (2) 이동은, 황인구, 전대일, 박심수, "연비향상을 위한 하이브리드 엔진 시스템 모델 개발과 최적화에 관한 연구", KSAE, Vol. 16, No. 6, pp. 65-73, 2008.
- (3) R. J. Saunder, E. A. Abdul-Wahab, "Variable Valve Closure Timing for Load Control and the Otto Atkinson Cycle Engine", SAE 890677, 1989.
- (4) 장태익, 김철수, 정영관, "디젤기관에 대한 앳킨슨 사이클 구성과 사이클의 열역학적 해석에 관한 연구", 한국박용기관학회지, Vol. 29, No. 2, pp. 185-193, 2005.

- (5) Yutaka Murata, Jin Kusaka, Yasuhiro Daisho, Daisuke Kawano, Kszakazu Suzuki, Hajime Ishiii and Yuichi Goto, "Miller-PCCI Combustion in an HSDI Diesel Engine with VVT", SAE Technical paper 2008-01-0644, 2008.
- (6) 현대자동차, "2012 YF 소나타 하이브리드 정비지침서", 골든벨, 2011, pp. 5-8.
- (7) ANSYS 14.0 manual, SAP IP. Inc., 2011.
- (8) 조용석, 이성욱, 장익규, 박정권, 윤여빈, 박영준, 김현철, 나병철, "가변밸브 작동기구를 적용한 가솔린 기관의 잔류가스분율, 체적효율, 펌핑손실 예측을 위한 해석적 연구", KSAE, Vol. 18, No. 2, pp. 7-13.
- (9) W. W. Pulkrabek, "Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine", Pearson, 2005, pp. 303-310.