

LIVC 적용 밀러사이클 스파크점화기관의 유동특성 연구

정진호* · 강선제* · 김진수* · 정석철* · 이진욱*†

A Study on Flow Characteristics of Spark-Ignited Engine with Variable Intake Valve Closing Timing for Miller Cycle

J. H. Chung, S. J. Kang, J. S. Kim, S. C. Jeong and J. W. Lee

Key Words: Miller cycle(밀러 사이클), Atkinson cycle(앳킨슨 사이클), Variable valve timing(가변밸브 개폐시기), Intake valve closing angle(흡기밸브 닫힘각)

Abstract

In this study, to research in-cylinder flow characteristics of spark-ignited engine with intake valve closing timing change for Miller cycle. 3D simulation study were used 6 different intake valve profile with CAD10° gap for retard intake valve closing timing. Comparison of In-cylinder flow pattern characteristic were accompanied between Base and LIVC. And the efficiency of volume and the work of compression were analyzed with simulation study. When intake valve closing angle was retarded in CAD50°, the pressure in cylinder was decreased about 12~13 bar and volume efficiency was reduced about 16%. The efficiency of volume and the work of compression were reduced on LIVC.

약어설명

LIVC : Late Intake Valve Closing

EIVC : Early Intake Valve Closing

1. 서 론

1.1 연구 배경

세계적으로 화석연료의 고갈에 대응하기 위하여 가솔린 엔진과 디젤 엔진의 효율을 향상시키는 연구가 많이 이루어지고 있다. 가솔린 엔진의 경우에는 다운사이징,

가솔린 직접분사, 희박연소, 급속연소, 배기가스재순환 그리고 가변밸브타이밍 등의 분야에서 많은 연구가 이루어지고 있다⁽¹⁾.

특히 단기간 내에 실현가능하다고 판단되는 기술 중 이미 상용화 되어 적용되고 있으며 빠르게 확산되고 있는 기술은 하이브리드 자동차 관련기술이며, 국내 자동차회사에서도 하이브리드 차량을 출시하는 등 연구개발에 박차를 가하고 있다.

밀러사이클 기관을 실현하는 방법으로는 흡기 밸브의 닫힘각 조절을 통해 유효압축비를 낮춤으로써 상대적으로 팽창비를 크게 하는 방법이 많이 적용되고 있다. Fig. 1은 닫힘각 조절방법에 따른 두 가지 방식을 보여준다. 통상적인 시기보다 빠르게 조절하는 EIVC방식과 통상적인 시기보다 늦도록 조절하는 LIVC방식이다. EIVC 방식은 하사점 이전에 흡기밸브가 닫히기 때문에 흡입 공기의 압력이 낮아 냉각효과로 노킹은 감소하나, 흡기 밸브의 개방기간이 짧아 고회전 영역에서는 충분한 공기가 공급되지 못하는 문제가 있다. 반면, LIVC 방식은

(Received: 12 Jan 2016, Received in revised form: 23 Feb 2016, Accepted: 24 Feb 2016)

*승실대학교 대학원 기계공학과

†교신저자, 승실대학교 기계공학과

E-mail : immanuel@ssu.ac.kr

TEL : 02-820-0929

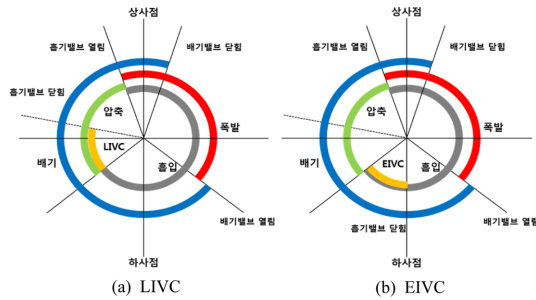


Fig. 1 Compare EIVC and LIVC valve opening and closing times

하사점 이후에 흡기밸브가 닫히기 때문에 실린더 주변의 열을 흡수하여 고온 상태로 되돌아간다. 이로 인해 충전 효율이 감소하지만 공기온도는 크게 낮추지 않는다^(2,3).

흡기밸브 닫힘각을 진각 또는 지각시킬 경우 흡기공기량이 감소하면서 체적효율은 감소하지만, 유효압축비가 낮아지고 펌핑손실이 감소하여 저압축-고팽창 기관을 실현하여 연료소비율을 3.5%~10%정도 향상시킬 수 있다는 기존의 연구 보고가 있다^(1,4,5).

1.2 연구 목적 및 내용

따라서 본 연구에서는 국내 상용 하이브리드 차량의 엔진 제원을 분석한 결과⁽⁶⁾, LIVC방식이 상용 하이브리드 차량에 적용되어 사용되고 있으므로, LIVC에 대한 실린더 내부유동을 정량적으로 분석하였다.

실린더 내부 유동해석은 닫힘각을 CAD10°씩 지각시키면서 해석을 진행하였다. 본 연구에서 사용된 ANSYS 14.0 기반의 Fluent 및 ICE툴에서는 연소 해석은 지원하지 않기 때문에 Cold flow해석을 통해 실린더 내부유동을 정량적으로 분석하였다.

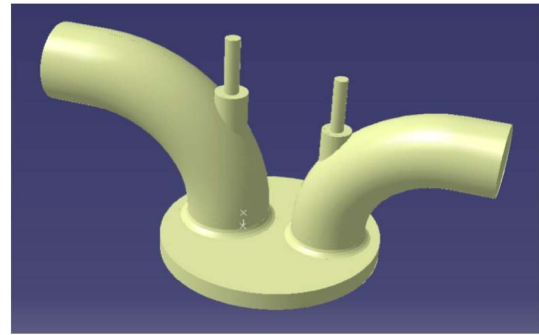
2. 해석 모델 및 방법

본 연구에서는 흡기밸브 닫힘각 변화에 따른 엔진 실린더 내부의 유동 특성을 분석하고 정량적으로 비교하기 위하여 해석적 기법을 사용하였다. 이를 위해 3D CAD 프로그램인 CATIA V5를 이용하여 실린더 내부형상, 피스톤, 밸브 및 흡·배기포트를 실험에 사용된 엔진을 실측하여 3D 형상 데이터로 구성하였다. Fig. 2은 실험용 엔진 및 3D 형상 데이터를 나타낸다.

3D 형상 데이터를 ANSYS 내 모델링 프로그램인



(a) Engine cylinder, Piston, Valves of Intake and Exhaust, Ports of Intake and Exhaust



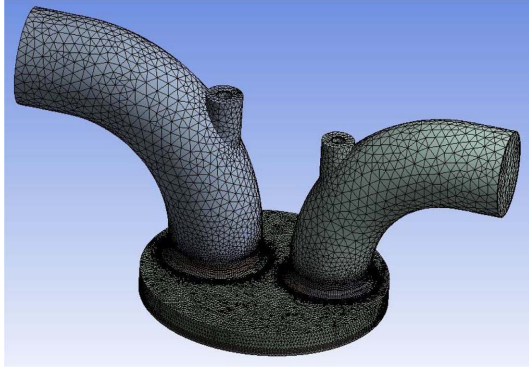
(b) Engine model with 3D CAD program

Fig. 2 Experiment engine and analysis model

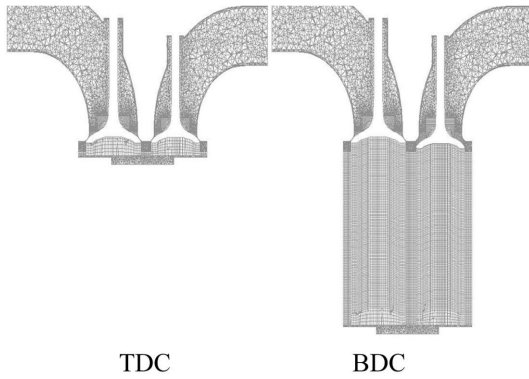
Desing modular를 이용하여 유동해석에 적합하도록 수정한 뒤 격자 생성 프로그램 ICEM CFD 14.0을 이용하여 격자를 생성하였다. 흡·배기포트 및 실린더 내부는 기본적으로 사면체격자로 구성하였으며, 밸브 및 피스톤의 움직임이 고려되는 영역에서는 프리즘격자를 이용하여 구성하였다. 피스톤 및 밸브의 움직임은 Fluent의 다이나믹 메쉬(Dynamic mesh) 기능을 통해 프리즘격자가 일정길이마다 레이어링(Layering)되도록 하였다. 사면체격자는 피스톤 및 밸브의 움직임에 따라 리메싱(Remeshing)되도록 설정하였다. 격자수는 상사점에서 약 74만개, 하사점에서는 약 160만개 정도로 구성되었다. Fig. 3은 상사점에서의 격자모델 및 단면도를 나타낸다.

크랭크각도에 따라 격자의 구성이 달라지기 때문에 해석을 수행하기 전 격자만을 CAD1°마다 구성하여 사면체격자의 왜곡도(skewness)가 0.9이하인 것을 확인한 이후 해석을 수행하였다.

Time step의 크기는 연소실, 밸브, 압력차, 피스톤속도, 밸브속도를 고려하여, 유속에 따라 CAD0.125°에서



(a) Grid Engine Model using 3D CAD data



(b) Cross-section of Grid Engine Model

Fig. 3 Grid Model and Cross-section for Analysis

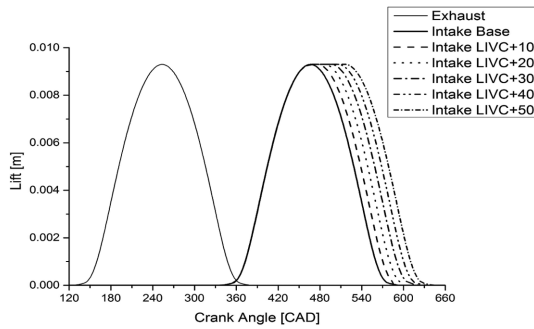


Fig. 4 Intake and Exhaust Valve Lift Curves of the Base and LIVC

CAD0.250°까지 조절하였으며, 최대 3260개의 time step에 대하여 계산하였다.

흡·배기 밸브의 움직임은 실험용 엔진과 동일한 조건을 기준으로 하여 다른 변수들은 고정하고 흡기밸브 닫힘각을 CAD10°씩 간격으로 변경하여 해석을 진행하였다. Fig. 4는 흡·배기밸브의 양정 곡선을 나타낸다.

Table 1 Specifications and boundary conditions of analysis engine model

Number of cylinder	1	
Bore x Stroke	92 x 95 mm	
Connecting rod	170 mm	
Displacement volume	631 cm ³	
Engine speed	1000 rpm	
Intake Pressure	1 Bar	
Exhasut Pressure	1 Bar	
Intake Valve	IVO	BTDC 18.5°
	IVC	Variable
Exhaust Valve	EVO	BBDC 51.5°
	EVC	ATDC 18.5°

해석조건은 단기통엔진의 실험조건과 동일한 1000 rpm, 대기압조건을 사용하였다. 해석에 사용된 모델의 제한 및 해석조건은 Table 1에 정리하였다.

수치해석은 대표적인 범용 전산유체역학 프로그램으로 신뢰성이 검증된 상용코드인 ANSYS 14.0의 Fluent를 사용하였으며, 난류모델은 유사 연구에서 많이 사용되고 있는 k-ε 모델을 사용하였다^(7, 8).

사용된 지배방정식 및 난류모델은 다음과 같다. 연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3-1)$$

운동방정식

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + u_j \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right] \quad (3-2)$$

난류에너지 및 소산을 난류모델

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

Standard k-ε 모델의 수송방정식

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \rho P - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (3-4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = C_{\varepsilon_1} \frac{\rho P}{k} - C_{\varepsilon_2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] \quad (3-5)$$

$$P = \frac{\mu_i}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} k \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \quad (3-6)$$

Standard k-ε 방정식의 경계조건

$$k = 1.5(I \times U)^2, \varepsilon = \frac{C_\mu^{0.75} k^{1.5}}{L} \quad (3-7)$$

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

$$C_{\epsilon_1} = 1.44, C_{\epsilon_2} = 1.92, \sigma_k = 1, \sigma_{\epsilon} = 1.3$$

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 흡기밸브 닫힘각에 따른 유동 특성

CAD10°단위로 흡기밸브 닫힘각을 변경하며 해석을 진행하였다. Fig. 5는 각 흡기밸브 닫힘각 변화에 따른 실린더내의 압력변화를 나타내었다.

실린더내의 압력변화를 살펴보면 LIVC가 CAD10°단위로 지각됨에 따라 최고압력이 단계적으로 줄어드는 것을 알 수 있다. 흡기밸브 닫힘각이 지각됨에 따라 실린더 내부로 유입되었던 공기들이 흡기포트를 통해 역류하면서 유효압축비 및 체적효율이 떨어졌기 때문으로 판단된다.

이러한 현상은 Fig. 6에 나타난 흡기포트로 유입되는 공기량의 변화를 통해서도 설명할 수 있다. BDC시점까지는 모든 해석조건에서 거의 유사한 양의 공기가 흡기포트를 유입되었으나, BDC이후에는 흡기밸브 닫힘각이 점차 지각됨에 따라 많은 양의 공기가 역류하는 것을 확인 할 수 있다.

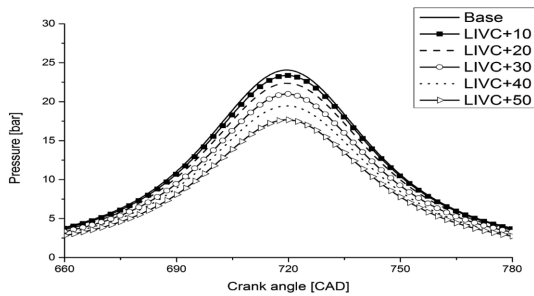


Fig. 5 Cylinder internal pressure of intake valve closing angle

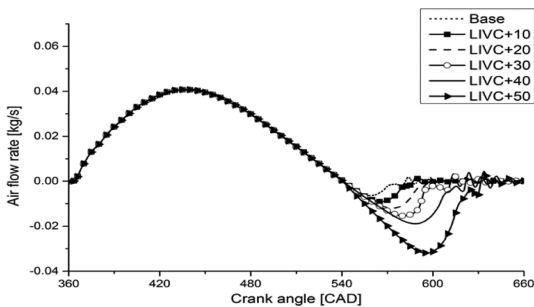


Fig. 6 Intake port flow rate of intake valve closing angle

Table 2는 각 해석조건별 CAD540°, 600°, 660°, 720°에 대해 밸브 중심 YZ단면의 velocity contour를 나타내었다. 모델링의 색상이 진할수록 내부유동이 크다. 따라서 앞서 흡기밸브의 공기유량을 통해 살펴본바와 같이 CAD540°에서는 LIVC의 적용에 관계없이 유사한 velocity contour 양상을 확인 할 수 있다. 하지만 이후 CAD600°부터는 닫힘각이 지각됨에 따라 내부유동의 양상이 변경되는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 실린더 내부의 Turbulent kinetic energy를 통해서도 확인할

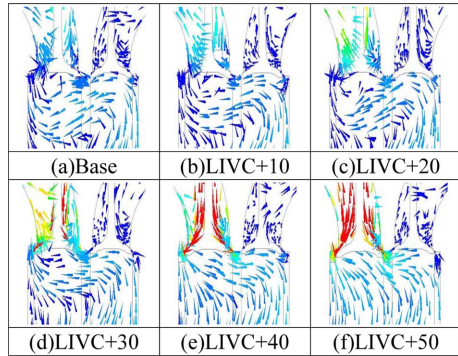
Table 2 Velocity contour of intake valve closing angle

	CAD 540°	CAD 600°	CAD 660°	CAD 720°
Base				
LIVC +10				
LIVC +20				
LIVC +30				
LIVC +40				
LIVC +50				

Table 3 Turbulent kinetic energy of intake valve closing angle

	CAD 540°	CAD 600°	CAD 660°	CAD 720°
Base				
LIVC +10				
LIVC +20				
LIVC +30				
LIVC +40				
LIVC +50				

Table 4 Vector plot of intake valve closing angle



수 있다. Table 3은 각 해석조건별 CAD540°, 600°, 660°, 720°에 대해 밸브 중심 YZ단면의 Turbulent kinetic energy를 나타내었다. 모델링의 색상이 진할수록 난류강도가 증가한다. 따라서 Base의 경우에는 CAD600°에서 이미 흡기밸브가 닫혔기 때문에 실린더 내부의 전체적인 난류강도가 약화되어 있으나, 닫힘각이 지각됨에 따라 흡기포트를 통해 역류하는 공기의 영향을 받아 난류강도가 증가하는 경향을 확인 할 수 있다. 증가된 난류강도는 피스톤이 TDC까지 상승하는 CAD660°, 720°에서도 확인 할 수 있다.

Table 4는 CAD600°에서의 흡기밸브 닫힘각 변화에 따른 밸브 주변에서의 YZ평면의 Vector plot을 나타낸다. 모델링의 벡터 방향은 공기의 흐름을 나타내고, 색상이 진할수록 실린더 내부 공기의 유량이 높다는 것을 나타낸다. 동일한 피스톤 위치에서의 vector plot을 나타내었으나, 흡기밸브의 닫힘각이 지각됨에 따라 실린더 내의 공기가 역류하는 현상이 LIVC+30 이후의 해석결과에서는 확연히 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 흡기밸브 닫힘각 변화에 따른 압축행정의 P-V선도를 나타낸다. 흡기밸브 닫힘각이 지각됨에 따라 체적효율과 유효압축비가 낮아지면서 사이클의 압축일이 작아지는 것을 알 수 있다. 연소과정이 없는 Cold flow 해석이기 때문에 사이클 전체의 펌핑손실에 대해서는 의미있는 결과를 얻기 어려우나, 압축일의 감소 현상을 통해 기관의 효율이 증가함을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 하이브리드 차량에 이용되고 있는 밀러사

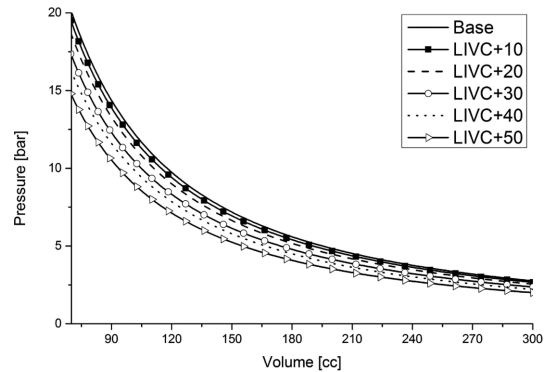


Fig. 7 Compressed work change of intake valve closing angle

이클을 LIVC용 캠샤프트 모델링을 통해 구현하고, 이를 통한 흡기밸브 닫힘각 변경에 따른 유동해석에 관한 것이다. 실험에서 사용할 엔진을 실측하여 3D 모델을 구성하고, 3D CFD 해석을 수행하여 해석하였다. 그리고 6가지 흡기밸브 닫힘각에 따른 실린더내 압력변화 및 내부유동 특성을 정량적으로 해석하였다. 본 연구를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 흡기밸브 닫힘각을 CAD50° 지각시켜 밀러사이클을 구현하여 기존 결과와 비교했을 때, 실린더내 최고 압력은 약 12~13 bar, 체적효율은 약 16% 가량 감소하였다.

(2) LIVC적용에 따라 실린더내로 유입되었던 공기가 흡기포트를 통해 역류되는 현상을 해석결과를 통해 정량적으로 밝힐 수 있었다.

후 기

본 연구는 2015년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 산업핵심기술개발사업 지원을 받아 수행된 것이며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Yunlong Li and Yiqiang Pei, Jing Qin, Shaozhe Zhang, Yu Shang, Le Yang, and Xuesong Wu, "Exhaust Gas Recirculation, Late Intake Valve Closure and High Compression Ratio for Fuel Economy Improvement in a MPI Gasoline Engine", SAE Technical Paper 2014-01-1197, 2014.

- (2) Sangmyeong Kim, Gisu Sung and Jinwook Lee, "Analysis of In-cylinder Flow in a Miller Cycle Engine with Variable IVC for HEV", Journal of ILASS-Korea, Vol. 19, No. 1, 2014, pp. 25-32.
- (3) Yu Wan and Aimin Du, "Reducing Part Load Pumping Loss and Improving Thermal Efficiency through High Compression Ratio Over-Expanded Cycle", SAE Technical Paper 2013-01-1744, 2013.
- (4) James Taylor and Neil Fraser, Rene Dingelstady and Hermann Hoffmann, "Benefits of Late Inlet Valve Timing Strategies Afforded Through the Use of Intake Cam In Cam Applied to a Gasoline Turbocharged Downsized Engine", SAE Technical Paper 2011-01-0360, 2011.
- (5) Hyundai Motor, "2012 YF Sonata Hybrid Maintenance Instructions", Golden bell, 2011, pp. 5-8.
- (6) H. S. Kim, "Performance and Emission Characteristics of a Controlled Auto-Ignition Gasoline Engine according to Variation", Soongsil University Graduate school, 2003, pp. 12-21.
- (7) Yutaka Murata, Jin Kusaka, Yasuhiro Daisho, "Miller-PCCI Combustion in a HSDI Diesel Engine with VVT", SAE 2008-01-0644, 2008.
- (8) Yong-Seok Cho, Seang-Wock Lee, Ik-Kyoo Jang, Jungkwon Park, Yu-bin Yoon, Young-Joon Park, Hyunchul Kim, Byung-chul Na, "Numerical Analysis for Prediction of the Residual Gas Fraction, Volumetric Efficiency and Pumping Loss with Continuous Variable Valve Lift System in an SI Engine", KSAE Vol. 18, 2010, pp.7-13.