

## 가변밸브 작동기구를 적용한 가솔린 기관의 잔류가스분율, 체적효율, 펌핑손실 예측을 위한 해석적 연구

조용석<sup>1)</sup> · 이성욱<sup>1)</sup> · 장익규<sup>2)</sup> · 박정권<sup>2)</sup> · 윤여빈<sup>2)</sup> · 박영준<sup>\*2)</sup> · 김현철<sup>3)</sup> · 나병철<sup>3)</sup>

국민대학교 기계자동차공학부<sup>1)</sup> · 국민대학교 자동차공학전문대학원<sup>2)</sup> · 자동차부품연구원<sup>3)</sup>

### Numerical Analysis for Prediction of the Residual Gas Fraction, Volumetric Efficiency and Pumping Loss with Continuous Variable Valve Lift System in an SI Engine

Yong-Seok Cho<sup>1)</sup> · Seang-Wock Lee<sup>1)</sup> · Ik-Kyoo Jang<sup>2)</sup> · Jung-kwon Park<sup>2)</sup> · Yu-bin Yoon<sup>2)</sup> · Young-Joon Park<sup>\*2)</sup> · Hyunchul Kim<sup>3)</sup> · Byungchul Na<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

<sup>2)</sup>Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

<sup>3)</sup>Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

(Received 13 March 2009 / Accepted 6 September 2009)

**Abstract** : To satisfy the needs on fuel economy and engine performance, continuous variable valve lift systems are applying to engines. In the CVVL system, fuel economy can be improved by reducing pumping loss during the induction process, and engine performance can be also improved by controlling volumetric efficiency and the residual gas fraction. Because the residual gas fraction directly affects volumetric efficiency, engine performance, combustion efficiency and emissions in SI engines, controlling residual gas fraction is one of the important things in engine development process. This analysis investigates the residual gas fraction and volumetric efficiency with changes of intake valve lifts and intake valve timings. In this study, unsteady state solutions were solved during exhaust and induction processes. Results show variation of the residual gas fraction and volumetric efficiency by changing intake valve timing and lift. Decreasing intake valve lift leads to increase the residual gas fraction and to decrease volumetric efficiency.

**Key words** : CFD(전산유체해석), Valve lift(밸브 양정), Valve timing(밸브 개폐시기), Residual gas(잔류가스), Volumetric efficiency(체적효율), Pumping loss(펌핑손실)

### 1. 서 론

최근 기관 기술 개발의 추세는 정밀한 기관 제어를 통한 성능 향상과 동시에 유해배기배출물 저감에 관한 기술과 연비개선에 중점을 두고 있다. 기관의 출력은 연소실 체적효율과 마찰손실, 펌핑손실 등에 따라 영향을 받는다. 체적효율은 기관의 형상,

기관회전속도, 밸브 이벤트에 의존하며, 가솔린 기관의 경우 펌핑손실에 의하여 연비가 저하된다. 각 운전조건에 따른 최대 출력을 내기 위하여 연소실 내 체적효율을 증가시키고 마찰과 펌핑일에 의한 손실을 줄이게 되면 연비개선과 출력향상으로 인한 기관성능 개선이 이루어진다.<sup>1)</sup> 그러한 최적화 과정에서 토크안정성이나 최대 출력은 저하시키지 않고 기관의 운전조건에 따라 최적의 흡·배기 유량과 시

\*Corresponding author, E-mail: yjpark@kookmin.ac.kr

기를 조절하여 연비를 향상시키고 유해배기배출물을 저감하기 위한 신기술로 가변밸브양정 및 타이밍 기술에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

기관 회전속도의 변화에 따라 연소실 내 체적효율이 변하게 된다. 기관 회전 속도에 맞는 흡기 행정 간 밸브 양정을 변화하여 흡입되는 혼합기량을 늘리고, 밸브의 열림 시기를 제어하여 잔류 가스 분율을 조절하고 체적효율을 증가시키면 기관출력향상, 연비 개선, 완전연소를 통한 유해배출물 저감이 가능하다.<sup>2,3)</sup> 이러한 가변밸브 작동 기구는 기구의 형상이나 작동방식에 따라 밸브양정과 타이밍 제어가 제한적이다. 따라서 실제 기술의 개발 단계에서 밸브양정과 열림시기의 제어범위를 설정하여 가변밸브 작동기구를 설계하는 것이 바람직하다.<sup>4)</sup>

본 연구에서는 가솔린 기관의 증속영역인 3000 rpm에서 CFD를 이용하여 가변밸브기구를 적용한 가솔린 기관에서 밸브양정 및 타이밍 변경에 따른 기관의 체적효율, 잔류 가스 분율, 펌핑손실을 예측하고자 하였다. 이를 위해 DOHC 가솔린 기관을 대상으로 밸브 및 피스톤의 움직임에 고려한 비정상 상태에서의 유동해석을 수행하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 수치해석기법

본 연구에서는 해석적 기법을 통해, 가솔린 기관의 흡기 및 배기과정의 유동 및 신기/잔류가스의 혼합 특성을 분석하고자 하였다. 이를 위해 피스톤 및 밸브의 움직임을 고려하는 비정상 유동해석 및 다이나믹 메쉬 기법을 적용하였고, 배기 과정 동안 연소실 가스와 흡기를 통한 신기의 혼합을 해석하기 위한 질량 수송모형을 적용하였다. 유동적 측면에서의 압력 분포 특성, 에너지 보존 법칙에 의한 열확산, 질량 보존에 의한 물질전달 특성을 고려하여 흡기 및 배기 밸브 개폐시기 및 양정 변화에 따른 배기 및 흡기 과정 특성을 분석하고자 하였다. 연구의 수치해석은 상용 코드인 FLUENT 6.3을 사용하였다. FLUENT에서 사용하는 지배방정식 및 난류모형을 간략히 요약하면 다음과 같다.<sup>5,6)</sup>

- 연속방정식

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

- 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, 소산율 난류모델

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

- Standard  $k-\epsilon$  모델의 수송방정식

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \rho P - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right]$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \epsilon)}{\partial x_i} = C_{\epsilon_1} \frac{\rho P}{k} - C_{\epsilon_2} \frac{\rho \epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right]$$

$$P = \frac{\mu_t}{\rho} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} k \frac{\partial U_m}{\partial x_m}$$

- Standard  $k-\epsilon$  방정식의 경계조건

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

$I$ : 입구의 난류 강도

$L$ : 유동의 특성길이

$$C_\mu = 0.09, C_{\epsilon_1} = 1.44, C_{\epsilon_2} = 1.92, \sigma_\epsilon = 1.3$$

물질전달에 관한 난류확산 모델은 다음과 같은 Fick's law에 근거한 모델을 적용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j Y_i) = -\frac{dJ_{ij}}{dx_i} + S_i$$

$$J_{ij} = -\left( \rho D_i + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial x_j}$$

$D_i$ : 화학종  $i$ 에 대한 질량 확산계수

$Sc_t$ : 난류 슈미트 수

### 2.2 수치해석과정 및 경계조건

수치해석을 위한 모델을 구성하기 위한 절차는 다음과 같다. 연소실 형상 데이터를 FLUENT 내 모델링 프로그램인 GAMBIT으로 불러들인 후 격자를 생성하였다. Half-cylinder 모델을 이용하였으며, 격자수는 상사점에서 약 10만개 정도이며, 하사점에서 약 16만개 정도이다. Fig. 1은 연소실 및 포트의 격자 모델을 나타낸다. 흡·배기 포트의 곡면부는 사

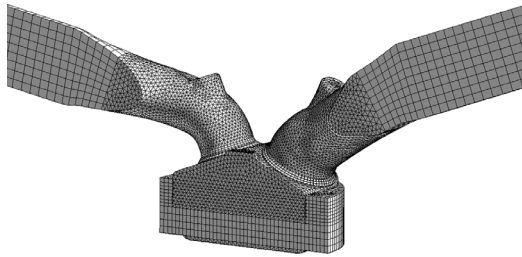


Fig. 1 Mesh generation for numerical analysis

면체격자로 구성하였고, 밸브의 움직임이 고려되는 영역에서는 육면체격자로 구성하였다. 또한 실린더 헤드 부분은 사면체격자로 구성하였고, 연소실과 피스톤의 집합부는 육면체격자와 프리즘격자로 구성하였다. 해석을 수행하기 이전에 격자만을 움직여 1°CA마다 사면체격자의 skewness가 0.85이하인 것을 확인한 이후 유동해석을 수행하였다.

잔류가스 분율과 체적효율을 계산하기 위하여 초기조건에서 연소실 및 배기포트 영역의 유체와 흡기관의 유체를 각각 지정하여 난류확산 방정식으로 기연가스와 신기의 혼합을 계산하였다. Time step size는 연소실과 포트의 압력차, 피스톤 속도, 밸브 양정을 고려하여, 유속에 따라 0.025°CA에서 0.5°CA 까지 조절하였으며, 최대 5,200개의 time step에 대하여 계산하였다. 주요 경계조건 및 초기 조건을 Table 1에 나타내었다. 본 연구에서는 가변밸브기구 적용에 따른 펌핑손실 변화를 비교하기 위하여 WOT(Wide Open Throttle)조건에서 해석을 수행하였으며, 이때 흡기관 입구 압력은 0.9 bar로 설정하

Table 1 Initial and boundary conditions and engine specification

Item	Specification	
Engine speed (rpm)	3000	
Stroke (mm)	97	
Bore (mm)	88	
Valve timing	IVO/IVC (°CA, baseline)	Variable
	EVO/EVC (°CA, fixed)	BBDC 34/ATDC 10
Intake pressure (bar, abs)	0.9	
Exhaust pressure (bar, abs)	1	
Intake gas temperature (K)	305	
Exhaust gas temperature (K)	700	

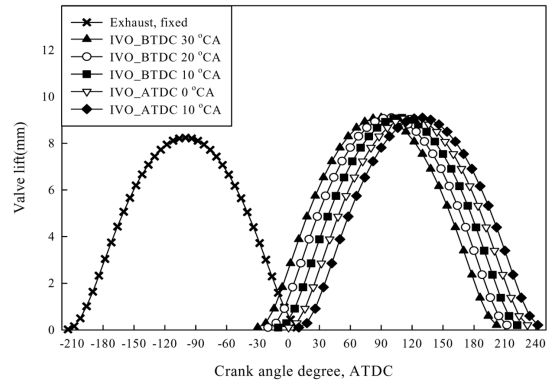


Fig. 2 Valve lift profiles with changes in intake valve timings

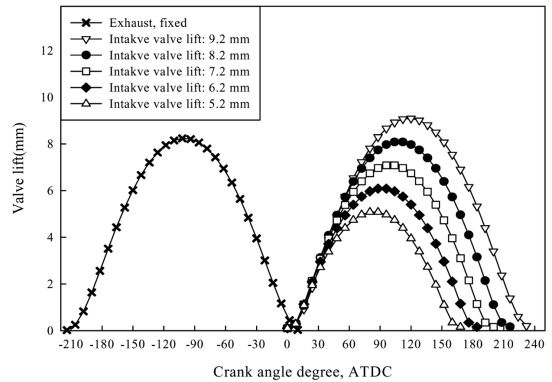


Fig. 3 Valve lift profiles with changes in intake valve lifts

였다. 흡기밸브 개폐 시기는 흡기밸브 양정을 동일하게 한 조건에서 열림 시기를 변경하여 사용하였으며, 흡기밸브 양정은 흡기밸브 열림 시기가 동일한 조건에서 5.2~9.2 mm까지 1 mm 간격으로 변경하였다. Fig. 2와 3에 위 조건에 대한 흡기밸브의 타이밍 변화와 양정 변화의 밸브 변화 곡선을 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 밸브 타이밍 변경

본 연구에서는 흡기밸브의 양정이 9.2 mm인 조건에서 흡기밸브 열림시기 변경에 따른 잔류가스분율과 체적효율 그리고 펌핑손실을 파악하였다.

##### 3.1.1 잔류가스 변화

Fig. 4는 ATDC 10°CA에서 흡기밸브 열림시기 변경에 따른 잔류가스 분포를 나타낸다. 검은색은 기

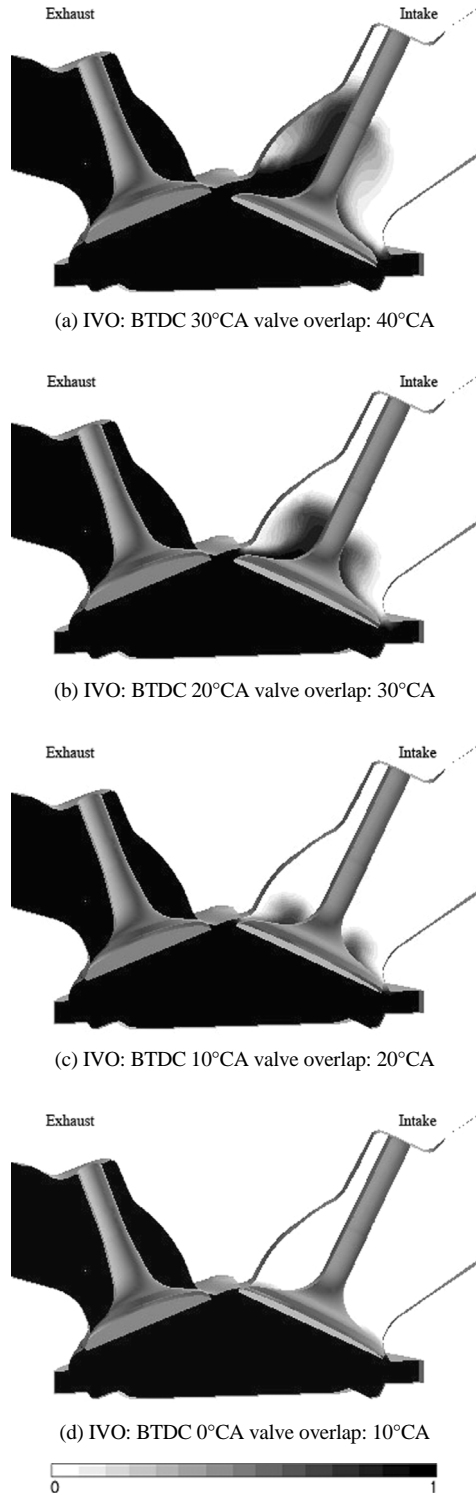


Fig. 4 The residual gas distribution with changes in IVO timings at ATDC 10°CA (black: burned gas, white: air)

Table 2 The residual gas fraction and mass with changes in IVO timings

IVO timing (°CA, BTDC)	The residual gas fraction(%)	Mass of the residual gas(mg)
30	6.13	20.30
20	5.93	19.41
10	5.64	18.12
0	5.61	17.45
-10	5.85	17.21

연가스를 흰색은 공기를 나타낸다. 우측이 흡기포트이며, 좌측이 배기포트이다. 흡기밸브 열림 시기가 진각될수록 밸브 오버랩 구간은 증가하며, 배기밸브는 ATDC 10°CA에서 닫히기 때문에 흡기밸브가 ATDC 10°CA에서 열리는 조건은 밸브 오버랩이 없는 조건으로 Fig. 4에 나타내지 않았다. Fig. 4에서 밸브 오버랩이 증가할수록 흡기포트로 역류하는 기연가스의 양이 증가하는 것을 볼 수 있다.

Table 2에 잔류가스량과 잔류가스분율을 정리하였다. 흡기밸브 열림 시기가 진각될수록 잔류가스의 양이 증가하는 것을 볼 수 있다. 현재 해석 조건의 경우 잔류가스량의 최대값과 최소값은 약 15%의 차이를 보이고 있다. 밸브 타이밍이 진각됨에 따라 밸브오버랩 구간에서 흡기관으로 역류량이 증가한 결과이다. 그러나 현재 해석 조건이 기관회전속도가 3000 rpm, WOT인 조건으로 밸브 오버랩 구간에서 흡·배기관 압력차에 의한 흡기관으로의 역류보다 피스톤 하향행정에 따른 부피팽창의 변화의 효과가 더 크게 작용하게 되어 잔류가스분율에는 큰 차이를 보이지 않고 있다. WOT 조건에서 신기 흡입량이 상대적으로 커 잔류가스량의 변화가 둔감하게 된 것으로 판단된다. 흡기밸브 열림 시기가 ATDC 10°CA의 경우 잔류가스량이 다른 조건에 비해 감소했음에도 잔류가스분율이 증가한 것은 흡기밸브 열림 시기가 지각되어 닫힘 시기가 지각되어 흡기관으로 신기가 역류한 결과로 볼 수 있다. 따라서 밸브 개폐 시기 변화에 따른 잔류가스분율의 변화는 잔류가스량과 체적효율을 동시에 고려해야 정확하게 구할 수 있다.

### 3.1.2 체적효율 변화

Fig. 5는 ABDC 40°CA에서 흡기밸브 닫힘 시기에 따른 연소실내 유동장과 속도벡터를 나타내고 있

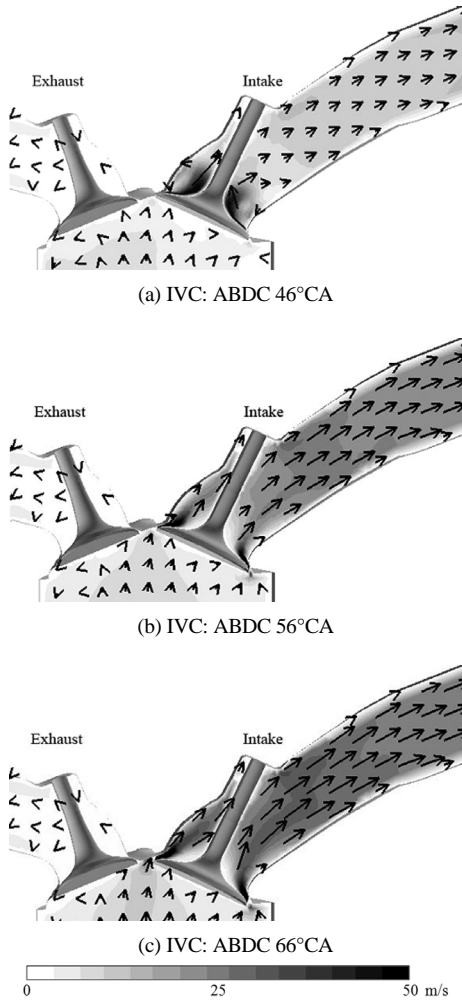


Fig. 5 Velocity distribution with changes in intake valve timings at ABDC 40°C

다. 그림에서와 같이 흡기밸브 닫힘 시기가 지각될수록 흡기관으로의 신기의 역류가 증가하여 체적효율을 감소시키게 된다. 이를 좀 더 명확하게 확인하기 위하여 Fig. 6에 연소실내 신기량의 변화를 나타내었다. 흡기밸브 열림 시기가 진각됨에 따라 흡입행정 말기에 연소실내의 신기량의 변화가 적은 것을 확인할 수 있다.

Table 3에 흡기밸브 열림시기에 따른 체적효율의 변화를 정리하였다. 앞서 살펴본 바와 같이 흡기밸브 열림시기를 진각시킨 경우 신기의 역류량이 줄어 체적효율이 증가한 것을 볼 수 있다. 또한 흡기밸브 열림 시기가 ATDC 10°C로 지각된 경우 하사점

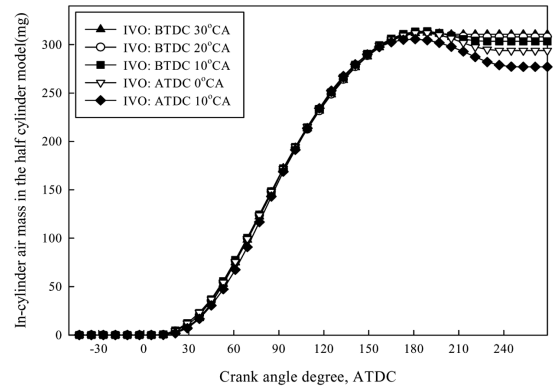


Fig. 6 In-cylinder air mass with changes in intake valve timings

Table 3 Volumetric efficiency with changes in IVO timings

IVO timing (°CA, BTDC)	30	20	10	0	-10
Volume efficiency(%)	92.80	92.01	90.62	87.78	82.78

근방에서 연소실로 유입된 공기의 질량이 낮은 것을 볼 수 있으며, 이로 인하여 체적효율이 급격히 저하됨을 확인할 수 있다. 이는 피스톤이 하사점 부근으로 하향행정을 할 때 흡기밸브의 통로면적(curtain area)이 상대적으로 넓기 때문에 유속이 느려져 흡입 공기의 관성효과가 약하기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.1.3 펌핑손실 변화

Fig. 7는 흡기밸브 타이밍 변경에 따른 P-V선도로 나타낸 것이고, Table 4는 PMEP 변화를 나타내고 있다. 흡기밸브 열림 시기가 지각될수록 펌핑손실이 증가함을 볼 수 있다. 이는 오버랩 기간 동안 흡기밸브가 열리는 과정에서 밸브 시트 부분의 면적이 작아 흡입되는 공기량에 비하여 피스톤의 하강에 의한 연소실내 체적 증가분이 커짐으로 인해 발생하는 것으로 판단된다.<sup>7)</sup> 특히 흡기밸브 열림 시기가 ATDC 10°C인 경우, 오버랩 구간이 매우 적어 펌핑손실이 매우 크게 증가한 것을 볼 수 있다.

가솔린기관의 다양한 작동상태에 따라 흡·배기관의 압력차 및 평균피스톤 속도가 변화하게 된다. 이 때 밸브 개폐시기를 조절할 경우 밸브 오버랩 구간의 변화로 잔류가스량을 조절할 수 있으나, 동시

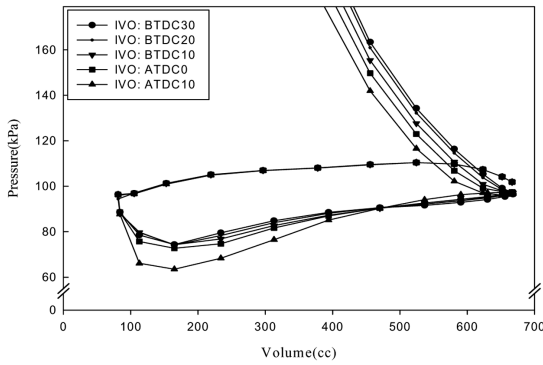


Fig. 7 P-V diagram with changes in intake valve timings

Table 4 Pumping loss with changes in intake valve timings

IVO timing (°CA, BTDC)	30	20	10	0	-10
PMEP(bar)	0.1990	0.2007	0.2044	0.2136	0.2449

에 체적효율 및 펌핑손실에도 영향을 미치게 된다.

### 3.2 흡기밸브 양정 변화

가솔린 기관의 중속 WOT 조건에서 흡기밸브의 양정이 9.2 mm일 때의 흡기밸브 열림 시기 변경에 따른 잔류가스 분율과 체적효율을 예측한 결과 밸브 오버랩 구간이 증가할수록 잔류가스의 양은 약간의 증가추세를 보이며, 체적효율은 흡기행정 말기에 흡기밸브 닫힘 시기의 변경으로 연소실에서 흡기포트로 역류하는 공기의 양이 변화함에 따라 영향을 받는다. 그러므로 WOT 조건에서의 낮은 펌핑손실을 유지하기 위해서 흡기밸브는 상사점 혹은 상사점 이전에 열려야 한다는 결론을 낼 수 있었다. 따라서 흡기밸브 양정 변경 시 흡기밸브 열림 시기는 잔류가스 분율, 체적효율 그리고 펌핑손실을 고려하여 상사점으로 설정하였다.

#### 3.2.1 잔류가스 변화

Table 5는 흡기밸브 양정 변경에 따른 잔류가스 분율을 나타내었다. 흡기밸브 열림 시기를 상사점으로 고정하고 밸브 양정을 변경한 결과, 7.2 mm 이상의 양정의 경우 잔류가스분율에는 큰 차이를 보이지 않으나 그 이하의 경우 잔류가스분율이 다소 증가함을 알 수 있다. 이는 오버랩 구간이 작고 흡·배기관의 압력차가 크지 않아 잔류가스분율이 낮은

Table 5 The residual gas fraction with changes in intake valve lifts, IVO: ATDC 0°CA

Intake valve lift(mm)	5.2	6.2	7.2	8.2	9.2
The residual gas fraction(%)	6.10	5.70	5.57	5.58	5.61

상태로 형성되어야 하나, 밸브 양정이 감소함에 따라 흡기밸브가 각각 하사점을 지난 직후에 닫히게 되면서 공기가 연소실로 유입되고 있는 도중에 흡기밸브가 닫혀 체적효율이 감소되고 잔류가스분율이 상대적으로 증가하는 것으로 판단된다.

#### 3.2.2 체적효율 변화

Table 6에 흡기밸브 양정 변경에 따른 체적효율을 나타내었고 Fig. 8에 흡기밸브 양정 변경에 따른 연소실로 유입된 공기의 질량을 나타내었다. 체적효율은 흡기밸브의 양정이 7.2 mm인 경우 약 93.8%로, 밸브 양정이 9.2 mm인 조건보다 체적효율이 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 흡기밸브 닫힘시기가 지각됨에 따라 피스톤의 상향행정 시 흡기관으로 역류하는 양이 줄어든 결과로, WOT 조건에서도 기관의 회전속도에 따라 밸브 양정을 조절할 경우 체적효율을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.

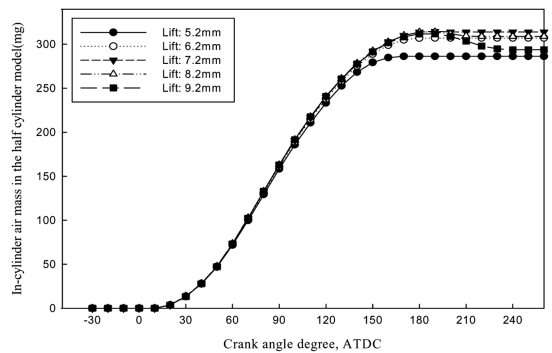


Fig. 8 In-cylinder air mass with changes in intake valve lifts, IVO: ATDC 0°CA, valve lift: 5.2~9.2 mm

Table 6 Volumetric efficiency with changes in intake valve lifts, IVO: ATDC 0°CA

Intake valve lift(mm)	5.2	6.2	7.2	8.2	9.2
Volume efficiency(%)	85.51	91.75	93.78	92.26	87.78

### 3.2.3 펌핑손실 변화

Fig. 9는 밸브 양정 변화에 따른 연소실 내 압력 변화를 나타내었고, Table 7은 밸브 양정 변화에 따른 PMEP의 변화를 나타내었다. 밸브 양정이 감소함에 따라 흡기밸브의 통로면적이 줄어 펌핑손실이 다소 증가함을 확인할 수 있었다. 현재 해석 조건이 WOT인 상태로 흡기관의 압력이 높아 전체적인 펌핑손실이 낮게 형성됨을 알 수 있으며, 이는 가솔린기관의 출력조절을 스로틀 개도 뿐만 아니라 밸브 양정을 동시에 조절할 경우 흡입공기의 양을 제어하면서도 기관의 펌핑손실을 낮게 형성할 수 있음을 의미한다.

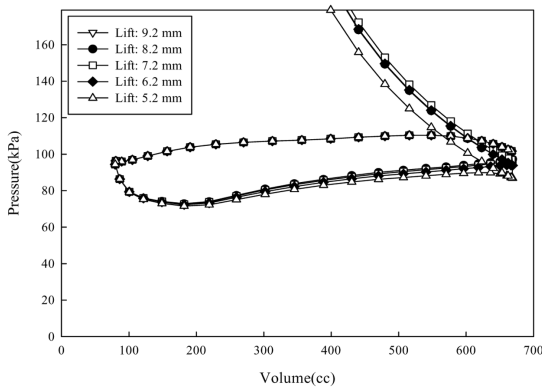


Fig. 9 P-V diagram with changes in intake valve lifts

Table 7 Pumping loss with changes in intake valve lifts

Intake valve lift(mm)	5.2	6.2	7.2	8.2	9.2
PMEP(bar)	0.2448	0.2278	0.2186	0.2137	0.2136

## 4. 결론

가솔린 기관의 중속 고부하 영역에서 연소실, 흡기관, 밸브 형상 및 피스톤과 밸브의 움직임을 구현하여, 밸브 개폐 시기 및 양정 변화에 따른 체적효율, 잔류가스분율, 펌핑손실 등을 예측하기 위하여 흡·배기과정 간 연소실 내부 유동해석을 진행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 흡기밸브 열림 시기를 지각시킬 경우 밸브 오버랩 구간의 증가로 흡기관으로의 기연가스 역류량이 감소하여 잔류가스양을 감소시킨다.

- 2) 흡기밸브 열림 시기를 전각시킬 경우 피스톤이 상향행정 중 흡기관으로 신기의 역류량을 감소시켜 체적효율을 증가시킨다.
- 3) 흡기밸브 개폐시기를 고정한 상태에서, 흡기밸브 양정만을 조절하여 잔류가스량은 크게 변하지 않으면서, 체적효율을 제어할 수 있다.
- 4) 스로틀 밸브와 가변 밸브 작동 기구를 이용하여 가솔린 기관의 출력을 조절하게 되면, 펌핑손실을 줄이고 체적효율과 잔류가스분율의 독립적인 제어가 가능하다.

## 후 기

이 연구는 지식경제부 핵심기반기술사업 중 자동차기반기술 개발사업 및 2009년도 국민대학교 교내연구비 지원 하에 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

- 1) T. Sugiyama, R. Hiyoshi, S. Takemura and S. Aoyama, "Technology for Improving Engine Performance using Variable Mechanisms," SAE 2007-01-1290, 2007.
- 2) S. Kiga, Y. Mae, Y. Akasaka and K. Tomogane, "Development of Innovative Variable Valve Event and Lift (VVEL) System," SAE 2007-01-3548, 2007.
- 3) H. B. Lee, H. Kwon and K. Min, "Effects of Various VVA Systems on the Engine Fuel Economy and Optimization of a CVVT-VVL SI Engine using 1D Simulation," Int. J. Automotive Technology, Vol.8, No.6, pp.675- 685, 2007.
- 4) J. Koo and C. Bae, "Effects of Variable Valve Timing Operation Modes on Engine Performance," Transactions of KSAE, Vol.9, No.6, pp.24-29, 2001.
- 5) H. Temekes and J. L. Lumley, A First Course in Turbulence, The MIT Press, pp.50-73, 1972.
- 6) FLUENT Manual V.6.3, FLUENT Inc., 2006.
- 7) G. B. Parvate-Patil, H. Hong and B. Gordon, "An Assessment of Intake and Exhaust Philosophies for Variable Valve Timing," SAE 2003-32-0078, 2003.