

# 가솔린 기관의 공회전 시 밸브 타이밍 변경에 따른 잔류가스 유동 변화에 관한 해석적 연구

이 준 호<sup>1)</sup> · 김 득 상<sup>1)</sup> · 백 두 성<sup>2)</sup> · 조 용 석<sup>\*2)</sup>

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

## Numerical Analysis of Flow Characteristic of Residual Gas due to Changes in Valve Timings during an Idle Operation in an SI Engine

Joonho Lee<sup>1)</sup> · Duk-Sang Kim<sup>1)</sup> · Doosung Baik<sup>2)</sup> · Yong-Seok Cho<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received 3 February 2006 / Accepted 13 April 2006)

**Abstract** : Residual gas fraction in a combustion process is very crucial to improve combustion and cyclic variations. Especially, the residual gas fraction is strongly affected by backflow of the residual gas during the valve overlap period in an idle operation. Therefore, it is one of the most interesting that valve timings can affect flow characteristics of gas exchange process, especially during idle operation. This analysis investigates residual gas fraction with respect to valve timing changes which is critical for combustion efficiency and engine performance. Flow characteristics of residual gas by changing intake and exhaust valve timing are calculated by CFD methodology during an idle operation in an SI engine. It is analyzed that retarded EVO and advanced IVO results in the increase of valve overlap period and consequently, residual gas fraction. Futhermore, changes in IVO have stronger effects on variation of residual gas fraction.

**Key words** : CFD(전산유체역학), Idle operation(공회전), Valve timing(밸브타이밍), Residual gas(잔류가스), Valve overlap(밸브 오버랩)

### 1. 서 론

공회전 정상상태 구간에서 밸브 타이밍 변경에 의한 연소실 내의 잔류가스 양의 변화는 연소안정성 및 배기가스 온도에 영향을 주는 것으로 관찰되었다.<sup>1)</sup> 그러므로 기관의 안정적인 작동상태 및 효율적인 연소를 위해서 공회전 시 연소실 내의 잔류가스를 정확히 파악, 분석하는 것은 무엇보다 중요하다. 공회전 정상상태는 스로틀이 차단되고, ISA(Idle Speed Actuator)에 의해서만 공기공급이 이루어지므

로, 흡기압이 다른 기관상태보다 크게 낮아지게 된다. 그러므로 연소실 내에서는 흡기밸브와 배기밸브가 동시에 열리는 밸브 오버랩 구간 중, 연소실 내의 기연가스가 흡기관 쪽으로 역류하는 현상이 발생한다. 이러한 역류현상은 다음 사이클에서 연소실의 내부 EGR 효과를 일으켜 기관의 안정성과 연소효율을 저하시키고, 배기배출율을 증가시킬 가능성을 내포하고 있다.<sup>2)</sup> 따라서 현재 상용화 되어있는 VVT 엔진들에 있어서 공회전 구간의 적절한 밸브 타이밍 변화는 더 나은 기관 안정성, 연소효율 및 배기배출물 감소를 이룰 수 있다고 생각된다. 본 연구에

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

서는 공회전 영역의 밸브 오버랩 구간에서 연소실 내의 연소가스 역류현상을 고찰해 보기 위하여, 기관회전수를 공회전 상태로 설정하고, 밸브 타이밍 변화가 연소실 내의 잔류가스에 어떠한 영향을 미치는지를 연구하고자 한다. 이제까지 실험을 통한 연소실 내의 잔류가스 분율을 측정, 평가<sup>3,4)</sup>하고 가시화하는 것은 매우 어려운 문제로 인식되어져 왔으며, 측정이 가능하다 하더라도 많은 시간과 비용이 소요되면서 그 측정오차가 크게 발생할 수 있는 매우 난해한 문제라고 생각되어져 왔다. 그러나 컴퓨터를 이용한 수치해석 기법은 다양한 조건에 따른 유동현상을 파악하여, 각 현상의 물리적 원인을 효과적으로 분석할 수 있으므로,<sup>5,6)</sup> 이와 같은 실험적 어려움을 효과적으로 보완할 수 있을 것으로 기대한다. 본 연구에서는 공회전 정상상태 구간에서의 연소실 내 잔류가스양을 분석하기 위하여 CFD 유동해석 기법을 적용하여 밸브 타이밍 변화에 따른 연소실 내의 잔류가스 양을 분석하고자 한다.

## 2. 수치해석

### 2.1 수치해석기법

본 연구의 수치해석은 상용 코드인 FLUENT를 사용하였다. FLUENT에서 사용하는 지배방정식 및 난류모델을 간략히 요약하면 다음과 같다.<sup>7)</sup>

- 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

- 비선형항의 난류점성 가정을 통한 선형화

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

- 부시네스크 가설에 의한 난류모델

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

- Standard  $k - \varepsilon$  모델의 수송방정식

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \varepsilon)}{\partial x_i} &= C_{\varepsilon_1} \frac{\rho P \varepsilon}{k} - C_{\varepsilon_2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] \\ P &= \frac{\mu_t}{\rho} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} k \frac{\partial U_m}{\partial x_m} \end{aligned} \quad (4)$$

- Standard  $k - \varepsilon$  방정식의 경계조건

$$k = 1.5(I \times U)^2, \varepsilon = \frac{C_{\mu}^{0.75} k^{1.5}}{L} \quad (5)$$

I: 입구의 난류 강도

L: 유동의 특성길이

$$C_{\mu} = 0.09, C_{\varepsilon_1} = 1.44, C_{\varepsilon_2} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y_i) &= -\frac{dJ_{ij}}{dx_j} + S_i \\ J_{ij} &= -(\rho D_i + \frac{\mu_t}{Sc_i}) \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (6)$$

$D_i$ : 화학종 i에 대한 질량 확산계수

$Sc_i$ : 난류 슈미트수

### 2.2 수치해석 과정 및 경계조건

모델 구성은 먼저 3D CAD 프로그램인 CATIA V5 R14를 이용하여 연소실 형상을 구성하고, FLUENT의 격자생성 모듈인 GAMBIT을 적용하여 해석격자를 구성하였다. 이후 FLUENT로 데이터를 옮겨 경계조건 및 초기조건을 입력시킨 후 해석을 수행한다. Fig. 1은 해석에 적용된 해석모델을 나타낸다.

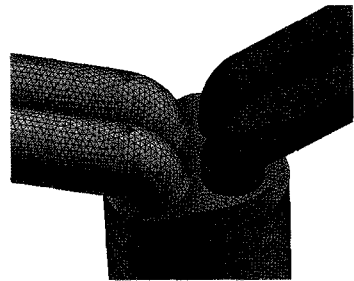


Fig. 1 Mesh generation for numerical analysis

Fig. 1에 보이는 바와 같이 격자생성은 계산의 효율성과 정확성을 높이기 위해 흡배기 입구의 곡면 부 및 형상이 복잡한 실린더 헤드 부분은 사면체격자로, 밸브움직임이 고려되는 영역에서는 육면체격자로 구성된 하이브리드 격자계를 사용하였다. 이를 통해 해석과정 중 피스톤 및 밸브의 움직임이 일어날 때, 격자의 영역이 쉽게 확대되어지도록 하였다. 각 해석모델의 유효 격자수는 평균 35만개이며, Pentium- 4(2.4GB) PC에서 1500개의 시간스텝에 대하여, 스텝당 20회 반복 계산을 수행하였다. 이때 계산시간은 평균 약 35시간이 소요되었다.

Table 1 Boundary and initial conditions of numerical analysis

Item	Specification
Engine idle speed	700rpm
Baseline IVO / IVC	BTDC 8°CA /ABDC 40°CA
Baseline EVO / EVC	BBDC 50°CA/ATDC 10°CA
Changes in EVO	12°CA(advanced) 12°CA(retarded)
Changes in IVO	12°CA(advanced) 12°CA(retarded)
Intake pressure	40kPa
Exhaust pressure	100kPa
Turbulence model	Standard k-ε
Initial turbulence kinetic energy	2% of inlet velocity
Initial turbulence characteristic length	30mm

신기와 실린더 내의 잔류가스의 혼합을 통한 잔류가스 분율을 해석하기 위하여, 초기조건에서 실린더 내와 흡기관의 유체를 각각 유체 A, B로 지정하여 난류확산 방정식으로 잔류가스 혼합을 계산하였다. 이때 기연가스는 질소, 신기는 공기의 물성치를 부여하여 해석을 수행하였다. 또한 연소후의 배기가스는 신기에 비해 온도가 높기 때문에 600K의 온도를 부여하였으며, 신기는 300K의 온도를 주어 열확산에 의한 질량전달의 난류확산 해석을 수행하였다. 기관회전수는 공회전 시 회전수인 700rpm으로 설정하였으며, 흡기압은 ISA에 의하여 제어되는 조건이므로 다른 기관작동 상태 흡기압보다 낮은 40kPa으로 설정하였다. 이외의 밸브 타이밍 변경 및 수치해석에 적용된 경계조건은 위의 Table 1과 같다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 배기밸브 타이밍 변화에 따른 잔류가스 유동분포

Fig. 2는 배기밸브 타이밍을 기준점 및 기준점에서 12°CA 진각, 12°CA 지각시켰을 때, ATDC 10°CA에서 연소실 주변의 잔류가스 분율을 나타낸 그림이다. 1로 표시된 검은 부분은 기연가스를 나타내고 0으로 표기된 흰부분은 신기를 나타내고 있다.

Fig. 2를 보면 흡기밸브가 열리는 시점에서 연소실의 배기가스가 흡기관 쪽으로 역류하는 것을 볼 수 있다. 이는 공회전 정상상태에서 흡기관 쪽의 압력이 배기과정 동안의 연소실 압력보다 낮기 때문에 생각할 수 있다. 가솔린기관에서는 출력제어를 스로틀개도에 의한 공기량 변화를 이용하기 때문에, 공회전 및 저부하 영역에서는 스로틀개도가 작아 흡기다기관의 압력이 연소실과 배기관 압력보다 크게 낮다. 이때 오버랩 기간 동안의 피스톤 상승운동으로 인해 배기과정 중의 기연가스는 배기관보

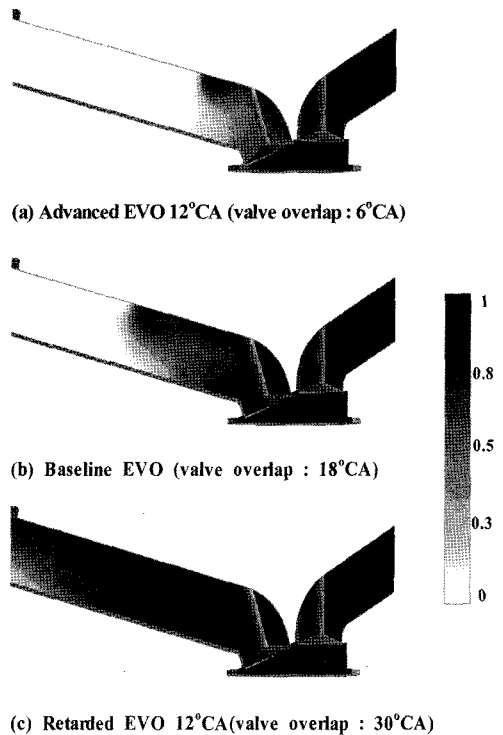


Fig. 2 Distributions of residual gas fraction in the cylinder with changes in EVO timings at ATDC 10°CA

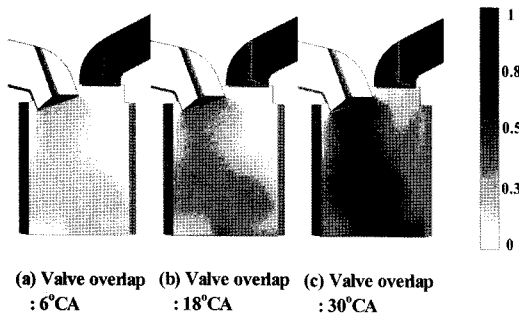


Fig. 3 Distributions of residual gas fraction in the cylinder with changes in EVO timings at ATDC 150°CA

다 상대적으로 낮은 압력을 가지는 흡기다기관 쪽으로 역류현상이 발생하게 된다. Fig. 3은 흡기과정 말기인 ATDC 150°CA에서 연소실 내부의 잔류가스의 분포를 나타낸 그림으로 배기밸브가 닫히고 흡입과정이 진행되면, 오버랩구간 동안 흡기관으로 역류한 기연가스가 연소실로 유입되어 연소실 내 잔류가스 분율을 높이는 것을 알 수 있다.

공회전 정상상태에서 연소실 내의 잔류가스량은 밸브오버랩 구간 중 배기관으로 나가는 기연가스보다 흡기관으로 역류하는 기연가스에 따라 좌우된다고 설명할 수 있다. 즉 Fig. 2의 (a), (b), (c)를 비교하면, 배기밸브 타이밍이 지각되어 밸브오버랩이 증가하면 흡기관 쪽으로 역류하는 배기가스의 양이 증가하는 것을 확인할 수 있고, Fig. 3에서 보이는 바와 같이 증가한 기연가스의 역류량으로 인해 연소실 내 잔류가스 분율이 오버랩이 클수록 커지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 배기밸브 타이밍 변화에 따른 연소실 내의 잔류가스 분율을 계산한 그래프이다. 밸브 오버랩 구간의 변화로 인하여 흡기과정 말기에 배기밸브 타이밍이 지각되었을 경우 42.9%, 기준상태에서 18.5%, 진각되었을 경우 11%의 잔류가스 분율을 갖는 것으로 계산되었다. 이를 통해 오버랩이 커질수록 연소실 내의 잔류가스 분율이 커지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4의 흡기과정 말기 계산값을 보면, baseline을 기준으로 동일한 크랭크 각으로 12°CA 씩 진각, 지각시켰지만, 배기밸브 타이밍을 지각시킨 경우가 진각시킨 경우보다 연소실 내의 잔류가스 분율의 차이가 18%로 확연하게 큰 것을 알 수 있다. 이와 같은 수치해석 결과를 기존의 배기밸브 타

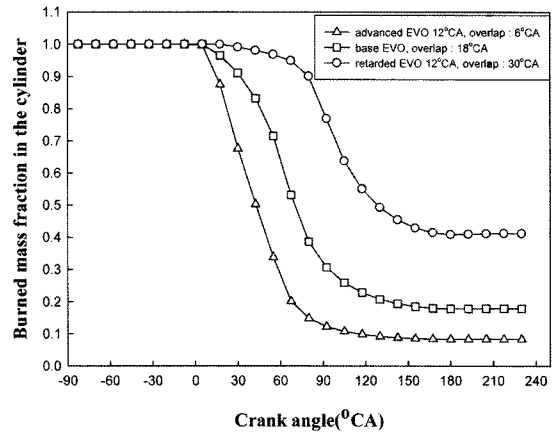


Fig. 4 Residual gas mass fraction in the cylinder with changes in EVO timings

이밍 변경 시 실험결과<sup>1)</sup>와 비교해 보면, 배기밸브 타이밍 지각 시 최대 열방출은 감소하나, 연소후기까지 열방출이 지속되는 것을 확인하였다. 이는 수치해석 결과에서 보여주듯이 배기밸브 타이밍 지각으로 인하여 증가된 연소실 내 잔류가스가 화염속도를 감소시켜 연소후기까지 연소를 지속시키는 것으로 설명할 수 있다.

Fig. 5는 valve overlap 구간동안 연소실 주변의 유동장 벡터를 나타낸다. 이는 Fig. 5와 같이 배기밸브 타이밍을 지각시켜 얻은 긴 오버랩 구간동안 기연가스의 역류는 연소실 내의 기연가스 뿐만 아니라, 배기밸브 근처에서 배기중인 기연가스까지 역류유동에 영향을 받기 때문으로 생각한다. 그러나, 배기밸브 타이밍을 진각시킨 경우, 짧은 오버랩 구간으로 인해 배기과정 중 연소실 내에 남아있던 기연가스만 역류시키므로, 배기밸브 타이밍을 지각시킨 경우의 역류량이 큰 것으로 생각할 수 있다.

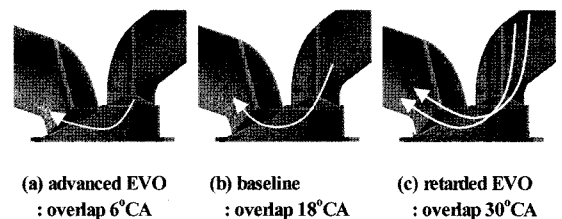


Fig. 5 Burned gas motion with the changes in EVO during overlap period

### 3.2 흡기밸브 타이밍 변화에 따른 잔류가스 유동분포

Fig. 6은 흡기밸브 타이밍을 기준점 및 기준점에서 12°CA 지각, 12°CA 진각시켰을 경우, ATDC 10°CA 연소실 내 기연가스가 역류하는 모습을 나타낸 그림이다.

흡기밸브 타이밍을 변경하였을 경우, 배기밸브 타이밍 변화와 마찬가지로 흡기밸브 타이밍을 진각시켜 밸브 오버랩 구간이 커지게 되면, 흡기관 쪽으로 역류되는 연소실 내 연소가스 양이 커지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7은 흡기과정 말기인 ATDC 150°CA에서 연소실 내부의 잔류가스 분포를 나타내는 그림이다. 흡기밸브 타이밍 변화에 따른 흡기관 쪽의 역류량 차이로 인해 흡기과정 말기 연소실 내 잔류가스 분을 변화에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 흡기밸브 타이밍 변화에 따른 연소실 내부의 잔류가스 분율을 비교한 그래프이다. 흡기밸브 타이밍을 진각시켰을 경우 48.1%, 지각시켰을 경

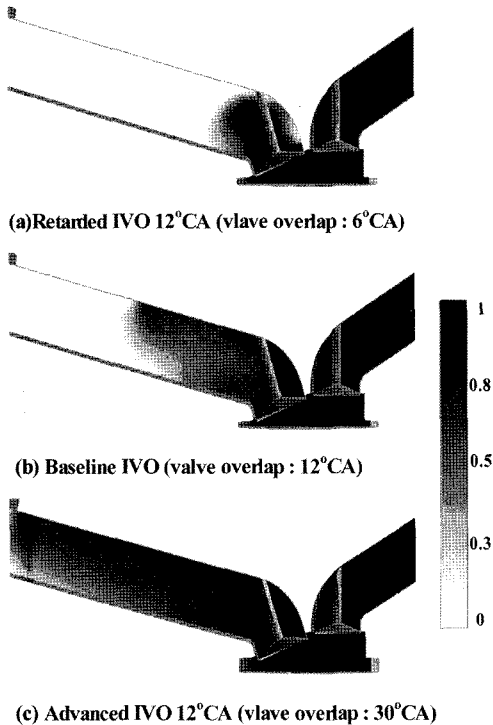


Fig. 6 Distributions of residual gas fraction in the cylinder with changes in IVO timings at ATDC 10°CA

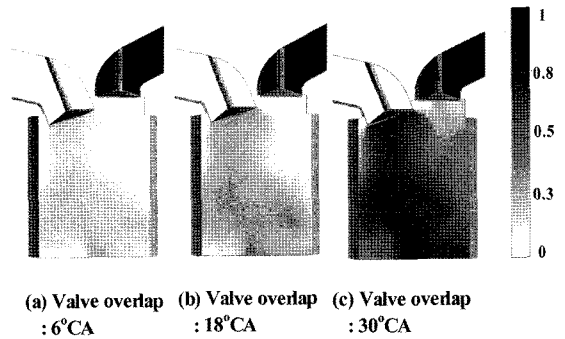


Fig. 7 Distributions of residual gas fraction in the cylinder with changes in IVO timings at ATDC 150°CA

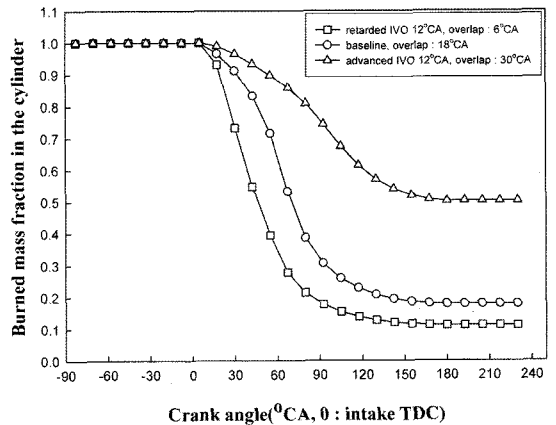


Fig. 8 Residual mass fraction in the cylinder with changes in IVO timings

우 9%로, 진각시켰을 때 흡기과정 말기에 연소실 내의 잔류가스 분율이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 오버랩구간의 증가로 흡기관으로 기연가스가 역류할 수 있는 구간을 증가시켰기 때문으로 설명할 수 있다.

### 3.3 배기밸브와 흡기밸브 타이밍에 따른 연소실 내의 잔류가스 비교

Table 2는 배기 및 흡기밸브 타이밍에 따른 연소실 내의 잔류가스 분을 계산값을 비교한 표이다. 흡기밸브 타이밍과 배기밸브 타이밍을 변화시켰을 시 동일한 밸브 오버랩구간에서 연소실 내의 잔류가스 분율이 다른 것을 확인할 수 있다. Baseline을 기준으로 동일한 오버랩 6°CA일 경우 흡기밸브 타이밍을 변화시켰을 시, 연소실 내 잔류가스 분율은 9%로

Table 2 Results of residual gas fraction in the cylinder with changes in EVO and IVO timings

Valve timing	Valve overlap		
	6°CA	18°CA (baseline)	30°CA
Changes in EVO	11.0%	18.5%	42.9%
Changes in IVO	9.0%	18.5%	48.1%

배기밸브 타이밍을 변화시켰을 시 11%보다 적은 것을 확인할 수 있다. 그리고 동일한 오버랩 30°CA에서는 흡기밸브 타이밍을 변화시켰을 경우, 연소실 내 잔류가스 분율 48.1%로 배기밸브 타이밍을 따른 42.9%의 잔류가스 분율 보다 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 흡기 및 배기밸브 타이밍에 따른 밸브 오버랩 구간의 위상을 나타내는 그림인 Fig. 9에서 설명할 수 있다.

Fig. 9를 보면 오버랩 6°CA로 동일할 때는 흡기밸브 타이밍에 의한 오버랩 구간의 위상이 피스톤이 상사점에서 하사점으로 이동하는 구간에 위치하게 되므로 연소가스의 역류량은 배기밸브에 의한 것보다 적어지게 된다. 반면에 오버랩이 30°CA로 동일할 때에는 흡기밸브 타이밍에 의한 오버랩 구간의 위상이 배기밸브 타이밍에 의한 오버랩 구간보다 피스톤 하사점에서 상사점으로 이동하는 구간에 더 많은 비율을 차지하게 된다. 그러므로 오버랩이 30°CA일 때에는 흡기밸브 타이밍 변화에 의한 역류량이 커지는 것으로 생각한다.

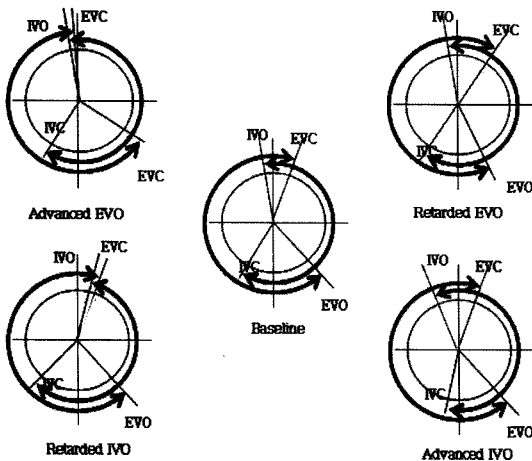


Fig. 9 Overlap position with respect to EVO and IVO timings

흡기밸브 타이밍을 변경하였을 경우가 배기밸브 타이밍을 변경했을 경우보다 연소실 내의 잔류가스 분율 변화에 더욱 민감하다는 것을 확인할 수 있다. 다만, 밸브 오버랩이 30°CA로 큰 경우에는 매우 높은 잔류가스 농도값을 얻었으나, 이 값은 실제의 실험치 등에서 소개되는 값에 비해 다소 높게 나타났다.<sup>8)</sup> 이러한 결과는 흡기시스템 형상이 단순화되어 맥동현상 및 공기관성이 충분히 고려되지 못하여 나타나는 오류로 생각할 수 있다. 그럼에도 불구하고, 다른 조건들에서는 해석에 의한 잔류가스 농도 계산이 정량적, 정성적으로 타당한 결과를 나타내고 있다고 할 수 있다. 또한 본 연구에 사용된 수치 해석기법은 공회전 조건 뿐만 아니라 중고속 영역 및 고부하 영역의 잔류가스 양의 예측 및 배기유동 분석에 효과적일 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

공회전 시 흡기 및 배기밸브 타이밍 변화에 의한 잔류가스의 분율 변화를 분석하기 위한 수치해석을 수행하였으며, 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

공회전 시 연소실 내 잔류가스 분율 변화는 흡기관과 연소실 및 배기관의 압력차로 인하여 오버랩 구간 동안 역류하는 기연가스에 의해 발생된다.

공회전 시 배기밸브 타이밍을 지각, 흡기밸브 타이밍을 진각시켰을 경우, 밸브오버랩의 증가로 인해 연소가스의 역류발생 구간이 길어지며, 이는 잔류가스 분율의 증가로 이어진다.

흡기 및 배기밸브 타이밍에 의한 잔류가스 분율 변화에 있어서 밸브타이밍 변화로 생기는 오버랩시작 피스톤 위치에 기인하여, 흡기밸브 타이밍으로 인한 연소실 내 잔류가스 변화가 배기밸브 타이밍 변화 시 보다 오버랩 6°CA일 경우 2%감소, 30°CA일 경우 약 6.5% 증가하는 것이 확인되었다. 그러므로 연소실 내 잔류가스 변화율에 있어서 흡기밸브 타이밍이 배기밸브 타이밍보다 큰 효과를 나타낸다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 미래형 자동차 배기가스 제로화 기술개발 사업 및 2006년도 국민대학교 교

내연구비를 지원받아 수행된 연구로, 연구지원에 감사드립니다

### References

- 1) D. S. Kim, J. Y. Lee, Y. H. Lee and Y. G. Cho, "Variation of Exhaust Gas Temperature with the Change of Spark Timing and Exhaust Valve Timing during Cold Start Operation of an SI Engine," Spring Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.58-64, 2004.
- 2) C. S. Kim, H. B. Song, J. H. Lee, J. S. Yoo, H. S. Cho and D. Y. Ahn, "Effect of Valve Timing on Residual Gas Fraction and Combustion Characteristics at Part Load Condition in an SI Engine," Transactions of KSAE, Vol.8, No.4, pp.26-33, 2000.
- 3) J. Y. Jang, K. Yeom and C. S. Bae, "Effects of Exhaust Throttling on Engine Performance and Residual Gas in an SI Engine," SAE 2004-01-2974, 2004.
- 4) M. J. Hall and P. Zuzek, Anderson W., "Fiber Optic Sensor for Crank Angle Resolved Measurements of Residual Gas Residual Fraction in the Cylinder of an SI Engine," SAE 2001-01-1921, 2001.
- 5) N. Cavina, C. Siviero and R. Suglia, "Residual Gas Fraction Estimation: Application to a GDI Engine with Variable Valve Timing and EGR," SAE 2004-01-2943, 2004.
- 6) U. Koehler and M. Bargende, "A Model for a Fast Prediction of the In-cylinder Residual Gas Mass," SAE 2004-01-3053, 2004.
- 7) Fluent Manual Version 6.1, Fluent Research Corporation, 2003.
- 8) H. S. Cho, K. W. Lee, J. H. Lee, J. S. Yoo and K. D. Min, "Measurements and Modeling of Residual Gas Fraction in SI Engines," SAE 2001-01-1910, 2001.