

# 밸브 리프트 변화에 따른 실린더 내 흡입 공기의 유동특성

## In-Cylinder Flow Characteristics Varying Intake Valve Lift

윤정외\*  
Jeong-Eui Yum

### ABSTRACT

The object of this study is to find new evaluation index for in-cylinder flow characteristics instead of current swirl, tumble coefficient using steady flow test rig on intake port system. To this end, port flow rig test was conducted on DOHC head varying intake valve lift respectively. Finally combination angular coefficient and inclination angle were introduced as new evaluation index for in-cylinder angular flow characteristics instead of swirl and tumble coefficient.

주요기술용어 : Intake Port(흡입포트), VVI(가변 밸브 타이밍), Steady Flow Rig Test (정상유동 리그시험), Swirl Coefficient(스윙계수), Tumble Coefficient(텀블계수), Combination Angular Coefficient(합성회전계수), Inclination Angle(회전 경사각), Swirl Parameter(스윙 파라미터), Tumble Parameter(텀블 파라미터), Combination Parameter(합성 파라미터)

### 1. 서론

가변 밸브 타이밍 시스템은 저속과 고속 모든 영역에서 효과적인 흡입 효율을 얻기 위해 캠 샤프트 위치를 상대적으로 변화시키는 방법을 채택하거나, 2개 또는 3개의 캠을 운전 조건에 맞추어 선택하는 방식을 채택하고 있다. 최근에는 전기적 방법에 의한 밸브 구동을 통해 모든 운전 영

역에 있어 최적의 밸브 운동을 조절하는 방법이 적용되기도 한다. 이때 실린더 내 유동은 밸브의 거동에 따라 스윙과 텀블이 서로 섞여 존재하게 되며 이들이 차지하는 상대적인 비중 또한 운전 조건에 따라 변하는 특징을 나타낸다.

본 연구는 최근 각광을 받고 있는 가변 흡입 시스템을 채택한 엔진의 실린더 내 유동 특성에서 흔히 나타나는 스윙과 텀블이 함께 존재하는 유동에 대한 리그 시험 평가에 관한 것으로, 연구의 목적은 기존에 사용하여 왔던 흡입 시스템의 리그시험 결과값인 스윙 및 텀블비가 가지는 문제점을 제시하고 이를 극복하기 위한 새로운 리그시험에서의 회전유동지수를 도출하는 것이다.

\* 정희원, 대우자동차 기술연구소

이를 위해 가변 흡입을 유도하기 위해 적용되어 지고 있는 VVT 시스템을 대상으로 흡입유동 리그 시험을 수행하였으며, 최종적으로 몇 가지 대표적인 밸브 리프트 변화에 대한 흡입 특성 변화 시험결과를 바탕으로 새로운 회전유동의 지수인 합성 파라미터(combination parameter)의 필요성을 제안하였다.

## 2. 시험 장치 및 엔진

Fig.1은 정상 유동시험 장비의 개략도이다. 그림과 같이 흡입 시스템의 유동 시험은 유동의 종류에 따라 다소 다른 방식을 취하지만 측정 원리는 동일하다. 측정은 일정 압력의 공기를 흡입 포트에 공급하면서 유량계를 사용하여 밸브 리프트 변화에 따른 공기 질량유량율( $\dot{m}$ ), 부피유량( $Q$ )과 스윙메타로부터 공기의 각운동량에 의한 토크 값( $\tau_S, \tau_T$ )을 함께 측정하여, 그들로부터 유량계수(flow coefficient,  $C_f$ ), 스윙계수(swirl coefficient,  $N_S$ ) 및 텀블계수(tumble coefficient,  $N_T$ )를 밸브 단면적( $A$ ) 및 실린더 단면적( $B$ )을 사용하여 아래의 식으로부터 구할 수 있다(1-3).

$$C_f = \frac{Q}{A V_0} \quad (1)$$

$$N_S = \frac{8 \tau_S}{m B V_0} \quad (2)$$

$$N_T = \frac{8 \tau_T}{m B V_0} \quad (3)$$

$$N_C = \sqrt{N_S^2 + N_T^2} \quad (4)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left( \frac{N_S}{N_T} \right) \quad (5)$$

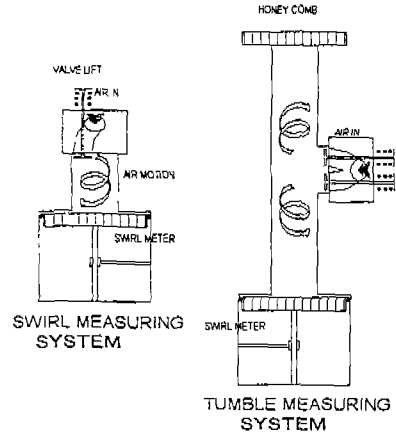


Fig.1 Schematic description of steady flow rig for measuring swirl and tumble flow

Table.1은 시험헤드 및 적용 엔진의 주요 제원으로, 테스트 헤드는 팬트루프 형태의 연소실과 4 밸브 DOHC 좌우 대칭형의 포트 형상을 가지고 있다.

Table 1 Specifications of test engine

| Engine Type              | 4-Stroke DOHC  |
|--------------------------|----------------|
| Intake port              | Dual Symmetric |
| Bore [mm]                | 79             |
| Stroke [mm]              | 81.5           |
| Valve Lift [mm]          | 8.5            |
| Valve Duration [deg.]    | 264            |
| Int. Valve Seat Dia [mm] | 27.5           |

## 3. 가변 밸브 타이밍을 위한 기초 유동실험

본 연구에서는 이러한 흡입 밸브의 다양한 운동 형태에 따른 실린더 내 유동 특성을 규명하기 위해 2개의 좌우 흡입 밸브의 리프트를 독립적으로 변화시키면서 그때의 스윙 및 텀블 유동에 대한 시험을 수행하였다

Fig.2는 흡입 밸브의 좌우 리프트 변화에 따른

유량계수(  $C_f$  ), 합성회전계수(  $N_C$  ) 및 회전경사각(  $\gamma$  ) 측정 한 결과이다.

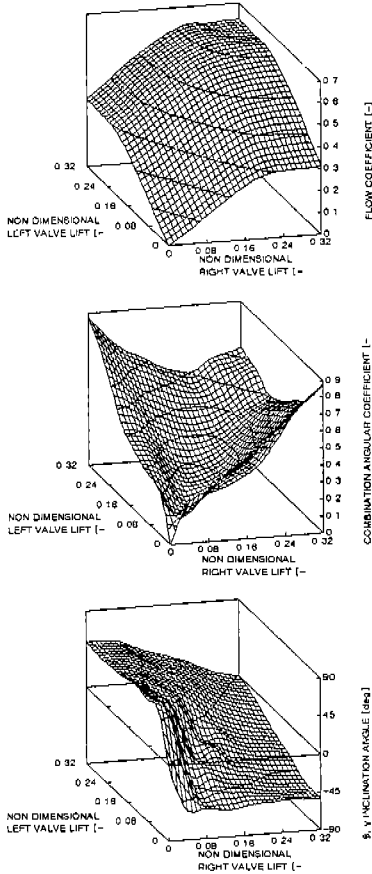


Fig.2 Flow characteristics varying lift of left and right intake valve respectively

그림으로부터 유량계수는 밸브가 리프트가 증가하거나 좌우밸브 모두가 열릴 경우 증가함을 알 수 있다. 또한 밸브 리프트가 증가하면 유량의 증가와 함께 실린더 내 흡입 공기의 유동의 회전(  $N_C$  ) 또한 증가한다. 흥미로운 사실은 한쪽 밸브만을 열었을 경우가 좌우 모든 밸브를 열었을 때에 비해 공기의 흡입량은 작지만 회전은 오히려 증가한다는 것이다. 이러한 원인은 한쪽 밸브만 열 경우 텀블외에 스웰 유동이 유도되기 때문이다. 그리고 시험헤드의 경우 한쪽 밸브만

열었을 경우는 스웰유동이(  $|\gamma| > 45^\circ$  ), 좌우 흡입 밸브를 모두 열었을 경우는 텀블 유동이(  $|\gamma| < 45^\circ$  ) 전체 유동을 지배한다는 것을 보여준다.

#### 4. 가변 밸브 타이밍에 대한 시뮬레이션

지금부터는 앞에서 언급한 정상 유동시험 결과를 바탕으로 시험 헤드를 중심으로 실제 적용되고 있는 여러 가지 가변 밸브 리프트를 적용했을 시 흡입 유동 말기 실린더 내 공기의 유동 특성을 시뮬레이션한 결과와 함께, 새로운 유동특성 지수의 사용 필요성을 제시하고자 한다.

Fig.3은 시뮬레이션에 사용한 밸브 리프트이다. 모든 경우에 있어 좌측 흡입 밸브 리프트는 우측 흡입 밸브 리프트 형상의 첫번째 CASE와 동일하게 유지한 후, 단지 우측 흡입 리프트를 Table.2의 Type A- D에 대해 각각 10-11가지씩 Table.2와 같이 바꾸어 가면서 흡입말기 실린더 내 공기의 흡입 특성 및 회전 유동 특성을 시뮬레이션 하였다.

일반적으로 정상유동 리그시험 결과로부터 흡입 말기 실린더 내 공기의 흡입 특성을 나타내는 지수로는 흡입밸브가 열려있는 동안의(  $\alpha_1, \alpha_2$  ) 유량계수(  $C_f$  )값과 엔진회전수(  $N$  ), 행정( stroke,  $S$  ), 밸브직경(  $D$  ), 개수(  $n$  ) 및 음속(  $a$  )을 이용하여 구한 아래의 식 (6), (7)의 평균 유량 계수(mean flow coefficient,  $\overline{C_f}$ ) 및 마하 인덱스(mach index,  $Z$ ) 가 주로 사용된다.

$$\overline{C_f} = \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_f d\alpha \quad (6)$$

$$Z = \left( \frac{B}{D} \right)^2 \frac{2SN}{naC_f} \quad (7)$$

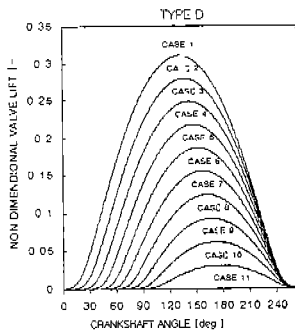
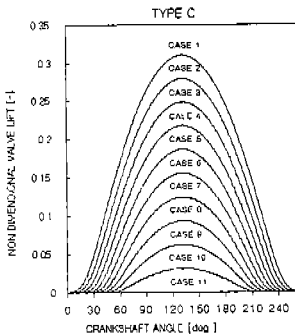
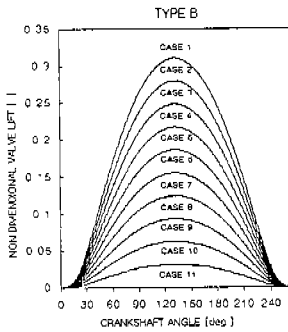
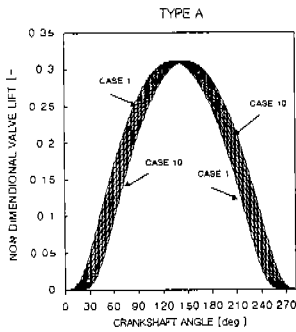


Table 2 Variation of lift profile and timing of right valve. Those of left valve are always the same as CASE 1 of right valve

| TYPE | CASE              |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|      | 1                 | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  |
| A    | Duration (deg)    | 204 | 204 | 204 | 204 | 204 | 204 | 204 | 204 | 204 | 204 |
|      | Valve Lift (%)    | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
|      | Phase Shift (deg) | 0   | 2   | 4   | 6   | 8   | 10  | 12  | 14  | 16  | 18  |
| B    | Duration (deg)    | 204 | 204 | 204 | 204 | 204 | 204 | 204 | 204 | 204 | 204 |
|      | Valve Lift (%)    | 100 | 90  | 80  | 70  | 60  | 50  | 40  | 30  | 20  | 10  |
|      | Phase Shift (deg) | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| C    | Duration (deg)    | 204 | 204 | 204 | 204 | 224 | 214 | 204 | 194 | 184 | 174 |
|      | Valve Lift (%)    | 100 | 90  | 80  | 70  | 60  | 50  | 40  | 30  | 20  | 10  |
|      | Phase Shift (deg) | 0   | 5   | 10  | 15  | 20  | 25  | 30  | 35  | 40  | 45  |
| D    | Duration (deg)    | 204 | 204 | 204 | 204 | 224 | 214 | 204 | 194 | 184 | 174 |
|      | Valve Lift (%)    | 100 | 90  | 80  | 70  | 60  | 50  | 40  | 30  | 20  | 10  |
|      | Phase Shift (deg) | 0   | 10  | 20  | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  | 90  |

Fig.4는 식 (6), (7)로부터 구한 밸브 리프트 변화에 따른 평균 유량계수 및 마하 인덱스의 계산결과로,  $\bar{C}_f$ 는 밸브 리프트와 열린기간 (opening duration)을 줄였을 경우 급격히 나빠지는 것을 알 수 있다. 마하 인덱스 그래프는 엔진 회전수를 6000rpm으로 했을 때 계산한 결과이다. 일반적으로 마하 인덱스가  $Z > 0.5$  이상의 값을 가질 경우에는 엔진의 체적효율이 급격히 떨어져 고속에서 엔진의 성능 저하를 초래한다 (4). 그럼으로부터 TYPE A의 경우를 제외하고는 급격한 체적효율의 저하가 있게 됨을 알 수 있다.

이와 함께 흡입시스템 설계 시, 흡입 말기 실린더 내 흡입 공기의 회전유동 특성을 나타내는 지수로 많이 사용하는 것이 아래의 식 (8), (9)로 정의 되는 스윙비 ( $R_S$ ) 또는 텀블비 ( $R_T$ )이다.

$$R_S = \frac{\omega_S}{\omega_E} = \eta L_D \frac{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_f N_S da}{\left[ \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_f da \right]^2} \quad (8)$$

$$R_T = \frac{\omega_T}{\omega_E} = \eta L_D \frac{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_f N_T da}{\left[ \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_f da \right]^2} \quad (9)$$

위의 식 (8), (9)에서  $R_S$ ,  $R_T$ 를 정의하기 위해서는 체적 효율( $\eta$ )에 대한 정보가 필요하나 정상 유동 테스트 리그를 사용하여  $\eta$ 를 구하는

Fig.3 Variation of lift profile and timing of right valve. In all cases, left valve lifts and timings are the same as CASE 1 of right valve

것은 불가능하므로 지금까지는 체적 효율이 100%라는 가정 하에서 ( $\eta=1$ ) 흡입 공기 유동 특성을 정의하여왔다.

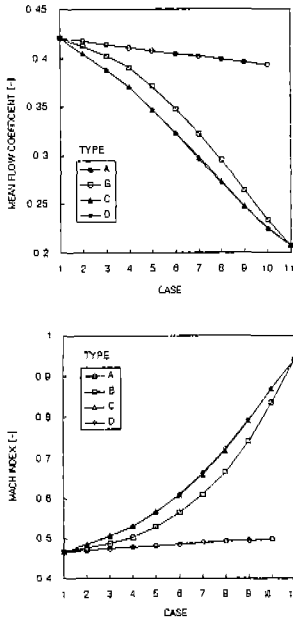


Fig.4 Mean flow coefficient ( $\overline{C_f}$ ) and mach index ( $Z$ ) for VVT strategy

그러나 지금까지 체적 효율이 서로 다른 흡입 시스템에 대한 흡입말기 실린더 내 공기의 회전 유동 특성을 서로 비교하기 위해서는 이러한 가정이 필요 없는 새로운 지수를 도입하는 것이 필요하다.

$$P_S = \frac{\omega_S B}{V_0} = \frac{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_f N_C \sin \gamma d\alpha}{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_f d\alpha} \quad (10)$$

$$P_T = \frac{\omega_T B}{V_0} = \frac{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_f N_C \cos \gamma d\alpha}{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_f d\alpha} \quad (11)$$

이를 위해 위의 식 (10), (11)과 같이 흡입 말

기 실린더 내 공기의 회전 각속도  $\omega_S, \omega_T$ 를 실린더 직경과 흡입 공기의 속도로 무차원한 형태의 파라미터( $P_S, P_T$ )를 정의하였다. 이 경우 체적 효율에 관한 가정이 필요 없게 되므로, 서로 다른 흡입시스템에 대한 흡입말기 실린더 내 공기의 회전 유동 특성을 비교 이해하는데 훨씬 유용한 지수로 사용할 수 있다.

Fig.5는 Fig.4의 밸브 리프트 변화에 따른 스웰비( $R_S$ ), 텀블비( $R_T$ ) 및 스웰 파라미터( $P_S$ ), 텀블 파라미터( $P_T$ )를 계산한 결과이다.

$R_S, R_T$  계산 시 체적효율은 100%라 가정하였다. 그림으로부터 스웰 및 텀블에 의한 흡입말기 실린더 내 흡입공기의 회전은 체적효율을 100%라 가정한 스웰, 텀블비로부터 계산한 결과와, 이러한 가정 없이 계산한 스웰, 텀블 파라미터로부터 계산한 결과를 서로 비교하여 보면 체적효율이 급격히 변하지 않는 TYPE A의 경우를 제외하고는 전혀 다른 경향을 보여준다. 즉 TYPE B,C,D에 있어서 CASE가 증가하면 텀블비 또한 증가하나 텀블 파라미터의 경우는 오히려 감소하는 결과를 보여준다. 이러한 차이의 가장 큰 원인은 텀블비의 계산 시 모든 CASE에 있어서 체적효율이 100%라는 가정을 하였기 때문이다. 그러므로 체적효율을 측정할 수 없는 정적 흡입 유동 시험에서 가변 밸브 타이밍 시스템과 같이 체적효율이 달라지는 흡입시스템의 흡입말기 공기의 회전을 대표하는 지수로 위에서 정의한 텀블 파라미터를 사용하는 것이 타당함을 알 수 있다.

위의 경우와 같이 스웰 및 텀블 유동이 섞여 있는 흡입 시스템의 정적 유동 리그 시험에서 흡입말기 실린더 내 공기의 스웰 및 텀블유동의 가시적인 이해를 위해서는 이들 유동에 의한 합성 유동을 하나의 지수로 표현하는 것이 효과적이다.

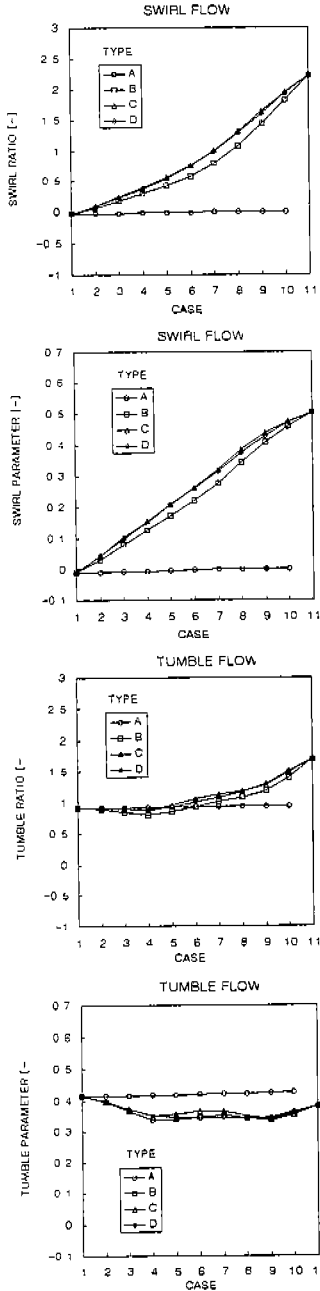


Fig.5 Comparison between swirl, tumble ratio and parameter of in-cylinder flow at the end of intake stroke

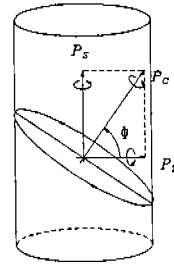


Fig.6 Vector composition of swirl and tumble parameter

Fig.6과 같은 방법으로 스웰( $P_S$ ) 및 텀블 파라미터( $P_T$ )를 벡터 합성한 결과( $P_C$ )를 흡입말기 실린더 내 공기 유동의 최종적인 지수로 정의하면 아래의 식 (12)가 구해진다. 그리고 이때 전체 회전유동의 경사각  $\phi$ 는 (13)식과 같이 표현할 수 있으며,  $|\phi| > 45^\circ$  일 경우는 스웰이,  $|\phi| < 45^\circ$ 에서는 텀블 유동이 흡입 말기 실린더 내 전체 회전유동을 지배함을 알 수 있다.

$$P_C = \sqrt{P_S^2 + P_T^2} = \frac{B}{V_0} \sqrt{\omega_S^2 + \omega_T^2} \quad (12)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{P_S}{P_T} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{\omega_S}{\omega_T} \right)$$

$$= \frac{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_f N_C \sin \gamma da}{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_f N_C \cos \gamma da} \quad (13)$$

Fig.7은 위의 계산식으로부터 구한 Fig.3의 TYPE A,B,C,D의 계산 결과이다. 그림으로부터 흡입 말기 실린더 내 공기의 회전축면에서는 우측 밸브의 리프트를 일정 값 이상으로 감소시키는 것(TYPE B,C,D)이 밸브 리프트 감소 없이 위상변화(phase shift)만 시킨 것(TYPE A) 보다는 유리하다는 것을 알 수 있으며, TYPE B,C,D의 경우 우측 밸브의 리프트 감소가 클수록 실린더 내 유동은 텀블보다 스웰이 강화되는

쪽으로 천이 된다는 것을 알 수 있다.

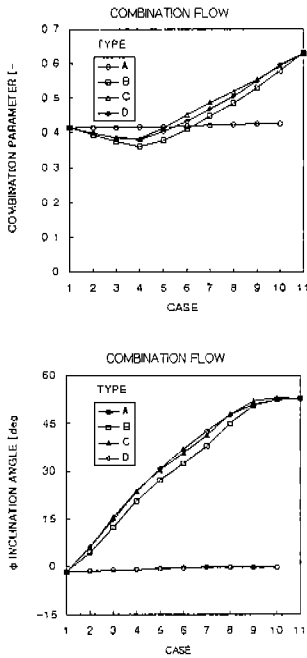


Fig.7 Combination parameter and inclination angle for combination flow at the end of intake stroke

## 5. 결 론

본 연구는 가변 흡입 시스템을 채택한 엔진의 실린더 내 유동 특성에서 흔히 나타나는 스윙과 텀블이 함께 존재하는 유동에 대한 리그 시험 평가에 관한 것으로, 연구의 목적은 기존에 사용하여 왔던 스윙 및 텀블비가 가지는 문제점을 제시하고 이를 극복하기 위한 새로운 리그시험에서의 회전유동지수를 도출하는 것이다. 이를 위해 VVT 시스템을 대상으로 흡입유동 리그 시험을 수행하였으며 시험결과를 바탕으로 새로운 회전유동의 지수인 합성 파라미터의 필요성을 제안하였다. 이러한 일련의 연구과정을 통해 얻은 요약된 결론은 아래와 같다.

(1) 체적효율을 측정할 수 없는 정적 흡입 유동 시험에서 가변 밸브 타이밍 시스템과 같이

체적효율이 달라지는 흡입시스템의 흡입 말기 공기의 회전을 대표하는 지수로 텀블 또는 스윙 파라미터를 사용하는 것이 타당하다.

(2) 스윙 및 텀블 유동이 섞여 있는 흡입 시스템의 정적 유동 리그 시험에서 흡입말기 실린더 내 공기의 스윙 및 텀블유동의 가시적인 이해를 위해서는 이들 유동에 의한 합성 유동을 하나의 지수로 표현하는 것이 효과적이다

(3) 이때 본문의 (13)식으로 정의되는 전체 회전유동의 경사각로부터,  $>45^\circ$  일 경우는 스윙이,  $<45^\circ$ 에서는 텀블 유동이 흡입 말기 실린더 내 전체 회전유동을 지배함을 알 수 있다.

(4) 시험 결과로부터 가변밸브 시스템의 경우, 흡입 말기 실린더 내 공기의 회전측면에서는 한쪽 밸브의 리프트를 일정 값 이상으로 감소시키는 것(TYPE B,C,D)이 밸브 리프트 감소 없이 Phase Shift만 시킨 것(TYPE A) 보다는 유리하다는 것을 알 수 있으며, 특히 한쪽 밸브의 리프트 감소가 클수록 실린더 내 유동은 텀블보다 스윙이 강화되는 쪽으로 천이 된다.

## 참 고 문 헌

1. T.G.Baker and C. J E Nightingale, "Port Throttling Port De-Activation Applied to a 4-Valve SI Engine", SAE960587.
2. Alain Floch, Jean Van Frank, and Afif Ahmed, "Comparison of the Effects of Intake-Generated Swirl and Tumble on Turbulence Characteristics in a 4-Valve Engine", SAE952457.
3. Woong-Chul Choi, Yann G. Guezennec and Il-Sub Jung, "Rapid Evaluation of Variable Valve Lift Strategies Using 3-D In-Cylinder Flow Measurements", SAE960951.
4. J.B.Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Book Comp, 1998.