

엔진 흡입포트 시스템 유동특성 규명을 위한 스월-텀블 합성효과에 관한 연구

A Study on Combined Effects between Swirl and Tumble Flow of Intake Port System in Cylinder Head

윤 정 의*
Jeong-Eui Yun

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.

주요기술용어 : Steady Flow Rig Test (정상유동장치 시험), Swirl Coefficient(스월 계수), Tumble Coefficient(텀블 계수), Combination Angular Coefficient(합성 회전 계수), Inclination Angle(회전 경사각), Intake Port(흡입포트)

1. 서 론

내연기관에 있어서 연소를 지배하는 가장 중요한 요소 중의 하나는 실린더 내 공기의 유동이다. 이러한 실린더 내 공기 유동 특성은 거시적 관점에서 스월, 텀블, 스퀴시로 구분하며, 엔진 설계자는 최적의 연소를 얻기 위해 흡입 포트, 밸브, 피스톤 크라운 및 연소실 형상을 적절히 설계하

여 이들을 조절한다.

공기 흡입 시스템을 설계할 때 최우선적으로 고려하는 것은 엔진 출력과 관련된 체적효율의 극대화와 최적 연소 측면의 유동특성 최적화이다. 이러한 극대화, 최적화를 위해서는 흡입 시스템의 설계 변경에 따른 체적효율 및 유동특성 값의 변화에 대한 규명이 필요하며, 설계단계에서 이러한 특성 값들을 규명하는데 가장 효과적으로 사용되는 것이 정상유동장치(steady flow rig) 시험이다.

일반적으로 가솔린 기관에서 특히 중요하게 취급하는 유동 특성은 스월과 텀블 유동이다. 지금까지 개발된 대부분의 엔진은 실린더 헤드 내 흡

* 정회원, 대우자동차 기술연구소

입 포트의 위치적인 특성으로 인해 2 밸브 엔진의 경우는 스윙 유동이, 4밸브 엔진은 텀블 유동이 실린더 내 유동을 지배하는 형식을 채택하여 왔으며, 이와 함께 흡입 시스템의 설계를 위한 유동시험 또한 2 밸브 엔진의 경우는 스윙 유동을 중심으로, 4밸브 엔진은 텀블 유동을 중심으로 수행하여 왔다.

최근 고효율, 배기가스 규제 및 연비 개선과 관련하여 많은 엔진에서 가변 흡입 시스템을 채택하고 있다(1-5). 이러한 가변 흡입 시스템은 운전의 조건에 따른 최적의 연소를 위해 흡입 공기 유로 및 밸브 타이밍 등 다양한 방식으로 공기 유동특성을 조절한다. 이 경우 실린더 내 유동은 스윙과 텀블이 서로 섞여 존재하게 되며 이들이 차지하는 상대적인 비중 또한 운전 조건에 따라 달라지는 특징을 가지고 있다. 그럼에도 불구하고 지금까지 이러한 시스템의 특성이 대부분 엔진의 최종적인 결과 값들 - 출력, 배출 가스, 연비 등으로만 표현되어져 왔으며, 정작 이들의 설계에 직접적으로 도움이 되는 유동 특성 측면의 연구 결과는 많지 않다.

본 연구는 스윙과 텀블이 함께 존재하는 유동에 대한 정상유동 시험 평가에 관한 것으로, 연구의 목적은 스윙과 텀블이 함께 존재하는 흡입 시스템의 유동 평가 시 기존의 이원화(스윙, 텀블)된 결과를 종합하는 방법을 제안한 연구이다. 이를 위해 DOHC 헤드의 흡입 밸브 리프트 변화에 따른 흡입유동 시험을 수행하였으며 시험결과를 바탕으로 새로운 회전유동의 지수인 합성 유동계수(combination angular coefficient) 및 그때의 회전 경사각(inclination angle)의 유용성을 제안하였다.

2. 시험 장치 및 엔진

흡입 공기의 실린더 내 유동 특성을 가장 정확하게 파악하는 방법은 LDV를 사용하여 국부적인 유속 및 난류 강도를 측정하거나, 또는 PTV, PIV기술을 사용하여 특정 단면 또는 3차원 유동

형태를 측정하여 이로부터 특성 값을 도출하는 것이다(2,3,6). 그러나 이러한 방법은 실린더 내 국부적인 유동 현상을 세밀하게 관찰하거나 과도상태(transient condition)의 유동을 규명하는데 매우 효과적이지만 시험 비용 및 시간적인 측면에서는 효율적이지 못하다. 이에 반해 짧은 시간에 흡입 공기의 유동 특성 값을 도출하고 이로부터 설계된 흡입 시스템의 대표적인 유동 특성 값들만을 도출하는 측면에서는 정상 유동시험 방법이 훨씬 유용한 수단이 될 수 있다.

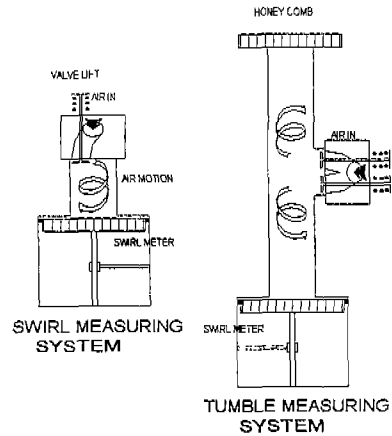


Fig.1 Schematic description of steady flow rig for measuring swirl and tumble flow

Fig.1은 정상 유동시험 장비의 개략도이다. 그림과 같이 흡입 시스템의 유동 시험은 유동의 종류에 따라 다소 다른 방식을 취하지만 측정 원리는 동일하다. 측정 시 흡입 공기의 압력은 흡입 포트에 공급되는 공기의 속도가 완전히 난류조건이 되는 범위(본 시험에서는 8 kPa를 사용)의 값을 사용한다. 이러한 일정 압력의 공기를 흡입 포트에 공급하면서 유량계(laminar flowmeter)를 사용하여 밸브 리프트 변화에 따른 공기 질량유량을(\dot{m}), 부피유량(Q)과 스윙메타로부터 공기의 각운동량에 의한 토크 값 (τ_s, τ_T)을 합

계 예측하여, 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(7-9).

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

$$N_s = \frac{8 \tau_s}{\dot{m} B V_0} \quad (2)$$

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

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

Fig.2는 테스트 헤드의 좌우 흡입 밸브 리프트를 같이 변화시켰을 때 유량계수 및 스윙, 텀블 계수의 변화를 구한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 테스트 헤드가 4밸브 DOHC 좌우 대칭의 구조를 가짐으로, 밸브 리프트가 증가함에 따라 스윙 계수의 변화는 거의 없으나 흡입공기의 유량계수 및 텀블 계수는 급격히 증가하는 경향을 가짐을 알 수 있다.

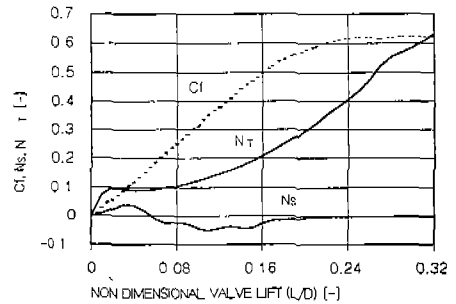


Fig.2 Flow (C_f), swirl (N_s) and tumble coefficient (N_T) varying lift of left and right intake valve simultaneously

3. 밸브 리프트 변화에 따른 흡입유동시험

본 연구에서는 흡입공기의 유동형태를 다양하게 변화시키기 위해 2개의 좌우 흡입 밸브의 리프트를 독립적으로 변화시키면서 그때의 스윙 및 텀블 유동에 대한 시험을 수행하였다.

Fig.3은 흡입 밸브의 좌우 리프트 변화에 따른 유량계수(C_f), 스윙 유동(τ_s) 및 텀블 유동시 토크(τ_T)를 측정된 결과이다. 그림으로부터 시험 헤드가 4밸브 좌우대칭 흡입 포트를 가지고 있기 때문에, 좌우 흡입 밸브의 리프트를 동일하게 변화시킬 경우 리프트 증가에 따라 스윙 유동에 의한 토크는 거의 0의 값으로 일정하게 유지되지만 텀블 유동에 의한 토크는 급격히 증가하는 경향을 볼 수 있다. 즉, 이 경우 실린더 내 유동은 텀블이 지배함을 알 수 있다. 그러나 좌측 또는 우측 밸브 리프트를 각각 독립적으로 변화시켰을 때는 이와 달리 스윙과 텀블이 서로 섞여 존재하게 됨을 알 수 있다. 한 예로 우측 흡입밸브는 닫아 놓은 채 단지 좌측 흡입밸브만을 변화시킬 경우 실린더 내 유동은 리프트 증가와 함께 스윙과 텀블이 동시에 증가하는 경향을 가지게 됨을 알 수 있다. 이와 같이 실린더 내 유동이 스윙과 텀블이 서로 섞여 있을 경우, 실제 실린더

내 공기는 이들이 합성된 형태의 유동을 가지게 된다.

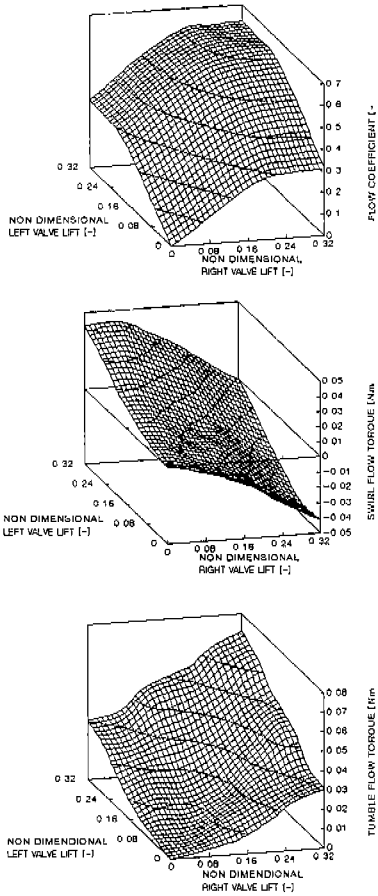


Fig.3 Flow characteristics varying lift of left and right intake valve respectively

Fig.4는 스윙과 텀블이 함께 발생하는 흡입 시스템에 대해 스윙 유동에 의한 토크 값(τ_s)과 텀블 유동에 의한 토크 값(τ_T)을 따로따로 측정하여 이들로부터 실제 실린더 내 유동의 토크 값 (combination flow torque, τ_C)을 구하는 과정을 표현한 그림이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 합성된 실린더 내 실제 유동(bulk motion)의 토크 값(combination flow torque,)과 합성

유동의 텀블 유동축에 기울어진 각(inclination angle, β)은 (4), (5) 식으로 정의할 수 있다. 이와 같은 방법으로 실린더 내 유동을 정의 할 경우, (5)식으로부터 $|\beta| > 45^\circ$ 경우는 실린더 내 전체 유동은 스윙이 지배하며, $|\beta| < 45^\circ$ 에서는 텀블이 지배함을 알 수 있다.

$$\tau_C = \sqrt{\tau_S^2 + \tau_T^2} \quad (4)$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{\tau_S}{\tau_T}\right) \quad (5)$$

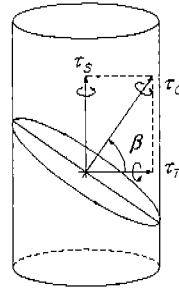


Fig.4 Vector composition of torque due to swirl and tumble flow

Fig.5는 흡입 밸브 리프트의 변화에 따른 실린더 내 유동의 회전에 의한 토크 값과 그때 유동의 기울어짐을 (4), (5) 식을 이용하여 구한 결과이다. 그림으로부터 좌우 흡입밸브 두개 모두가 완전히 열려져 있을 때 실린더 내 전체 유동의 회전 토크가 가장 큰 값을 갖게 되며 이때 실린더 내 유동은 텀블이 지배함을 알 수 있다 ($\beta \approx 0^\circ$). 이에 반해 좌우 어느 하나의 밸브는 닫아놓은 채 다른 하나의 밸브만을 완전히 열었을 경우는, Fig.3의 유량계수 (C_f) 결과로부터 알 수 있듯이 흡입 공기량이 좌우 두 밸브 모두를 열어 놓았을 때에 비해 감소함으로써 실린더 내

전체 유동의 회전 토크 또한 작은 값을 가진다. 그리고 이 경우의 유동은 스윙과 텀블이 섞여 있는 형태를 보이며 $\beta \approx 55^\circ$ 로 스윙 유동이 텀블 유동에 비해 다소 우세함을 보여준다.

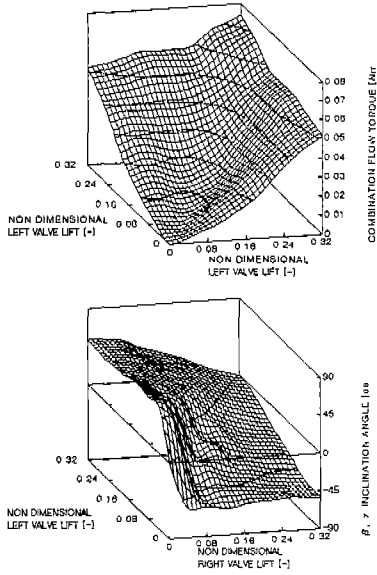


Fig.5 Combination flow torque(τ_C) and β, γ inclination angle

Fig.6은 측정 토크와 유량 값으로부터 (2), (3) 식을 사용하여 계산한 스윙 계수(swirl coefficient, N_S) 및 텀블 계수(tumble coefficient, N_T) 결과이다. 스윙 및 텀블 계수는 (2), (3)식으로부터 알 수 있듯이 흡입 공기의 회전 토크(τ)를 흡입 공기량으로 나누어 단지 흡입 공기의 회전 정도를 나타내는 계수로 Fig.3의 흡입 공기의 회전 토크(τ) 결과와는 다른 형태의 결과를 보여준다. 앞서서처럼 (4)식에서 정의한 실린더 내 유동(bulk motion)의 토크 값(combination flow torque, τ_C)을 사용하여 합성회전계수(combination angular coefficient,

N_C)를 아래 (6) 식과 같이 정의하면 텀블 계수에 대한 스윙 계수의 비로부터 정의되는 각 γ 는 (5)식의 β 와 동일한 의미를 갖게됨을 알 수 있다.

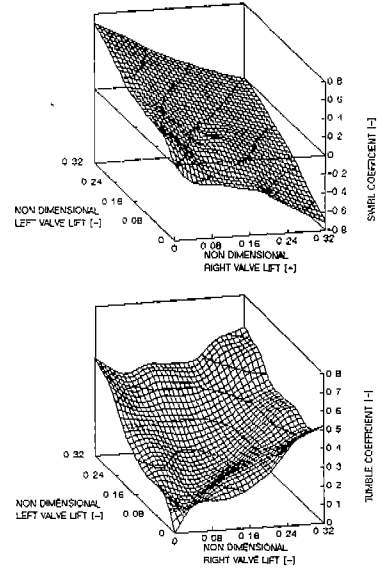


Fig.6 Swirl (N_S) and tumble coefficient (N_T) varying lift of left and right intake valve respectively

$$N_C = \frac{8 \tau_C}{mB V_0} = \frac{8\sqrt{\tau_S^2 + \tau_T^2}}{mB V_0} = \sqrt{N_S^2 + N_T^2} \quad (6)$$

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{N_S}{N_T}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\tau_S}{\tau_T}\right) = \beta \quad (7)$$

Fig.7은 (6)식으로부터 계산한 합성회전계수

(combination angular coefficient, N_C)의 계산 결과이다. Fig.5의 실린더 내 합성 공기 유동의 토크 값(combination flow torque, τ_C)과 Fig.7의 합성회전계수 (N_C)의 결과를 서로 비교하여 살펴보면, 좌우 흡입 밸브를 모두 열었을 때 비해 어느 한쪽만 여는 것이 흡입 공기의 부족으로 실린더 내 유동(bulk motion)의 전체 토크는 작지만 공기의 회전은 오히려 더 빨라진다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 한쪽 밸브만 열었을 때는 스윙에 의한 공기 회전이 급격하게 증가하기 때문이다.

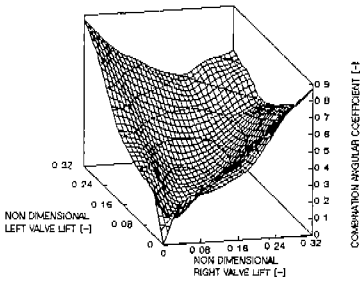


Fig.7 Variation of combination angular coefficient (N_C) against valve lift

4. 결 론

본 연구는 가변 흡입 시스템을 채택한 엔진의 실린더 내 유동 특성에서 흔히 나타나는 스윙과 텀블이 서로 함께 존재하는 유동에 대한 유동 시험 평가에 관한 것으로, 스윙과 텀블이 함께 존재하는 흡입 시스템의 유동 평가 시 기존의 이원화(스윙, 텀블)된 결과를 종합하는 방법을 제안한 연구이다. 이를 위해 DOHC 헤드의 흡입 밸브 리프트 변화에 따른 흡입유동 시험을 수행하였으며 시험결과를 바탕으로 새로운 회전유동의 지수인 합성회전계수(combination angular coefficient, N_C) 및 그때의 회전 경사각(inclination angle, β)의 결과를 제시하였다. 이러한 일련의 연구과정을 통해 얻은 요약된 결론

은 아래와 같다.

- (1) 흡입공기의 유량계수(C_p)는 한쪽 밸브만을 열었을 때 보다 좌우흡입 밸브를 동시에 열었을 때 훨씬 증가한다.
- (2) 시험헤드의 한쪽 흡입밸브만을 열 경우는 스윙과 텀블 유동이 동시에 유도된다.
- (3) 스윙과 텀블 유동이 함께 유도되는 흡입 시스템의 밸브리프트 변화에 따른 흡입유동의 회전특성 표현은 스윙(N_S)과 텀블 유동계수(N_T)를 따로 사용하는 것보다 이들을 벡터 합성한 합성회전계수(N_C) 및 텀블유동 축에 대해 합성 유동축의 기울어진 회전경사각(β)을 유동특성 값으로 정의하는 것이 전체 유동을 이해하는데 효과적이다.
- (4) 이때 흡입시스템을 통해 들어오는 공기의 실린더 내 유동은 $|\beta| > 45^\circ$ 일 경우 스윙이, $|\beta| < 45^\circ$ 일 경우 텀블 유동이 지배한다.
- (5) 시험헤드의 좌우 흡입 밸브를 모두 열었을 때 비해 한쪽만 여는 것이 실린더 내 유동(bulk motion)의 전체 토크는 작지만 공기의 회전(N_C)은 오히려 더 증가한다.

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 Affif 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. Takefumi Hosaka and Minoru Hamazaki,
"Development of the Variable Valve
Timing and Lift (VTEC) Engine for the
Honda NSX", SAE910008.
5. Jong-Cheol Lee , Chun-Woo Lee, and
James A. Nitkiewicz, " The Application
of a Lost Motion VVT System to a
DOHC SI Engine", SAE950816.
6. S.Omori, K.Iwachido, M.Motomochi and
O.Hirako, "Effect of Intake Port Flow
Pattern on the In-Cylinder Tumbling Air
Flow in Multi-Valve SI Engines",
SAE910477.
7. M.L.Monaghan and H.F.Pettifer, "Air
Motion and Its Effect on Diesel
Performance and Emissions", SAE810255.
8. Teoman Uzman, Claus Borgnakke and
Thomas Morel, "Characterization of Flow
Produced by a High-Swirl Inlet Port",
SAE830266.
9. J.B.Heywood, "Internal Combustion Engine
Fundamentals", McGraw-Hill Book Comp,
1988.