

가변 흡기시스템에 의해 유도되는 흡입공기의 유동특성 평가를 위한 새로운 3차원 회전유동 지수에 관한 연구

윤 정 의^{*1)} · 남 현 식¹⁾ · 김 명 환¹⁾ · 민 선 기²⁾ · 심 대 곤²⁾ · 박 병 완²⁾

강원대학교 메카트로닉스공학부¹⁾ · GM 대우자동차²⁾

A Study on the New 3-D Angular Flow Index for Evaluation of In-Cylinder Bulk Flow Characteristics of the Air Induced by Variable Induction System

Jeong-Eui Yun^{*1)} · Hyeon-Sik Nam¹⁾ · Myung-Hwan Kim¹⁾ · Sun-Ki Min²⁾ ·

Dae-Gon Sim²⁾ · Pyeong-Wan Park²⁾

¹⁾Division of Mechatronics, Kangwon National University, Gangwon 245-711, Korea

²⁾Department of Powertrain, Technical Center, GM Daewoo Auto&Technology Co., 199-1 Cheongcheon-dong, Bupyeong-gu, Incheon 403-714, Korea

(Received 4 May 2006 / Accepted 14 July 2006)

Abstract : It is very important to clarify the 3-D angular flow characteristics of in-cylinder bulk motion in the developing process of variable induction system. In-cylinder flow induced by variable induction system is very complex, so we can not describe the in-cylinder bulk flow characteristics using the conventional swirl or tumble coefficient. In this study, we introduced the new 3-D angular flow index, angular flow coefficient(N_B), for in-cylinder bulk flow characteristics. And also, to confirm the index, we carried out the steady flow rig test for intake port of test engine varying valve lift on the test matrix.

Key words : Swirl flow(스윙유동), Tumble flow(텀블유동), Intake system(흡기시스템), Angular velocity(회전속도), Angular torque(회전토크), Angular bulk flow coefficient(회전유동계수)

Nomenclature

B : bore diameter
 N_B : angular bulk flow coefficient
 N_S, N_T, N_C : swirl, tumble and cross tumble coefficients
 N_{Tmax} : maximum tumble coefficient
 Δp : pressure drop across the inlet valve
 V_o : characteristic velocity,
($= \sqrt{(2\Delta p)/\rho}$), m/sec

α, β : inclination angle
 $\tau_S, \tau_{Tx}, \tau_{Ty}$: angular torque of in-cylinder swirl, X-,Y-direction tumble flow [Nm]
 ρ : density of supplied air
 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$: angular velocity of x, y, z direction
 ω_B : angular velocity of in-cylinder bulk flow

1. 서론

최근 들어 고효율, 배기가스규제 및 연비 개선과 관련하여 많은 엔진에서 가변흡기시스템(SCV, VVT, VCT, port deactivation 등)을 채택하고 있다.¹⁻⁴⁾

*Corresponding author, E-mail: jeyun@kangwon.ac.kr

이러한 가변흡기시스템은 운전 조건에 따른 최적의 연소를 위해 흡입공기 유로 및 밸브 타이밍 등 다양한 방법으로 실린더로 흡입되는 공기의 유동 특성을 조절한다. 이 경우 흡기시스템을 통해 실린더 내로 유도되는 공기 유동은 스웰과 텀블 특성이 서로 섞인 형태가 되며, 실린더 내로 들어온 전체 유동 중에서 스웰과 텀블이 차지하는 상대적인 비중 또한 운전 조건에 따라 달라지는 특징을 가지고 있다. 이와 같이 유동 특성 값으로 스웰 또는 텀블값 하나의 값만으로 정의하기 어려운 가변흡기시스템과 관련한 여러 연구결과에서는 이들 시스템에 의해 유도되어지는 유동을 대표하는 마땅한 유동지수가 없다는 이유로 유동지수 대신 흡입시스템의 기하학적 형상값과 -(예: 한쪽 흡입포트를 모두 막는 형태의 SCV사용 경우, 왼쪽 1/2만 막는 SCV, 오른쪽 1/2만 막는 SCV 등)- 엔진의 연소 특성 및 최종적인 결과값들-burn duration, knock, torque, stability, emission, A/F 등-의 관계를 상관 지어 연구하여 오고 있다.^{5,6)} 그러나 이러한 연구는 유동지수 값을 사용하였을 때의 객관적이며, 정량적인 형태의 값보다는 정성적이며, 특정시스템에서만 적용이 가능한 결과 값을 줌으로서 실제 엔진 개발자가 시스템을 최적화하고자 할 때는 큰 도움을 줄 수가 없는 한계를 가지게 된다. 90년대 이후 가변흡기시스템에서 유도되어지는 실린더 내 유동처럼 복잡한 형태의 실린더 내 회전유동(rotational bulk motion)과 관련한 대표 유동지수의 개발에 대한 필요성이 여러 연구결과에서 제시되었으며, 이러한 필요성에 기초한 몇 가지 새로운 형태의 유동지수가 발표되었다.^{7,8)} 그러나 지금까지 발표된 3차원 유동지수는 단순히 스웰 및 텀블유동을 측정하여 합하는 형태의 식으로 이러한 형태의 유동지수는 가변흡기시스템과 같이 흡기시스템의 가변 전략에 따라 텀블유동의 회전축이 바뀌는 시스템에는 적용하기가 불가능하다.

본 연구는 정상유동시험장치(steady flow test rig)를 사용하여 측정할 수 있는 스웰 및 텀블 토크값($\tau_S, \tau_{Tx}, \tau_{Ty}$)으로부터 흡기시스템에 유도되는 흡입공기의 회전유동특성을 표현할 수 있는 일반화된 3차원 유동지수를 제시하고자 수행하였다. 즉, 기존에 제시하였던 텀블유동의 회전축이 일정한 경우에

만 적용이 가능한 회전유동지수를 - 아래 식 (3)에서 수직방향 텀블항(N_C)이 없는 경우 - 일반화하여 가변흡기시스템과 같이 흡기시스템의 가변 전략에 따라 텀블유동의 회전축이 바뀌는 시스템에도 적용이 가능한 형태의 일반화된 회전유동지수를 제안하는 것을 목적으로 추진하였다.^{7,8)} 이와 함께 제안한 회전유동지수의 타당성 검증과정을 위해 정상유동 시험장치를 사용하여 다양한 형태의 스웰 및 텀블 유동에 대한 시험을 수행하였다. 그리고 최종적으로는 정상유동 시험장치를 사용한 시험 값을 바탕으로 제시한 회전 유동지수의 타당성을 검증하였다.

2. 가변흡기시스템 평가를 위한 3차원 유동지수

물리적으로 임의의 시험조건에서 정상유동시험장치의 실린더로 유도되어지는 전체 공기의 회전유동(angular bulk motion) 각속도(ω_B)는 일정한 형태를 가질 것이며, 이러한 전체유동 (bulk motion) 각속도는 x, y, z방향의 각속도 함수로 표현될 수 있다(Fig. 1 참조).

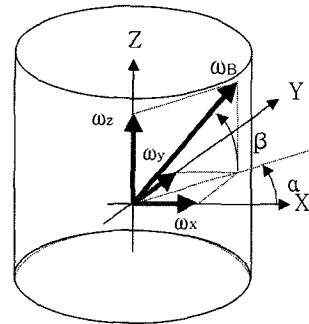


Fig. 1 Relationship among angular velocities

$$\vec{\omega}_B = \omega_x \vec{i} + \omega_y \vec{j} + \omega_z \vec{k} \quad (1)$$

식 (1)에서 각속도를 실린더의 직경(B) 및 정상유동시험에서 정의되는 특성속도(V_0)값을 사용하여 무차원화 한 후 새롭게 정리하면 실린더로 유도되어지는 전체 공기의 회전유동(angular bulk motion)에 대한 일반화된 3차원 유동지수인 회전유동계수(\vec{N}_B : angular bulk flow coefficient)로 사용할 수 있는 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{N}_B &= \frac{\vec{\omega}_B B}{V_o} = \frac{\omega_x B}{V_o} \vec{i} + \frac{\omega_y B}{V_o} \vec{j} + \frac{\omega_z B}{V_o} \vec{k} \\ &= N_T \vec{i} + N_C \vec{j} + N_S \vec{k} \\ &= |\vec{N}_B| (\cos\alpha \cos\beta \vec{i} + \sin\alpha \cos\beta \vec{j} + \sin\beta \vec{k}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$|\vec{N}_B| = \sqrt{N_T^2 + N_C^2 + N_S^2} \quad (3)$$

여기서 N_T , N_C , N_S 는 Fig. 1의 X축을 중심으로 회전하는 텀블값과 Y축을 중심으로 회전하는 텀블값 및 Z축을 중심으로 회전하는 스윙값으로 아래의 식 (4),(5),(6)으로 표현할 수 있다. 그리고 α 및 β 는 전체 공기의 회전유동(angular bulk motion)의 각속도(ω_B) 방향을 결정해주는 값으로 각각 N_T , N_C , N_S 값을 사용하여 (7),(8)과 같이 정의 할 수 있는 각도이다.

$$N_T = \frac{\omega_x B}{V_o} = \frac{8\tau_{Tx}}{V_o B m} \quad (4)$$

$$N_C = \frac{\omega_y B}{V_o} = \frac{8\tau_{Ty}}{V_o B m} \quad (5)$$

$$N_S = \frac{\omega_z B}{V_o} = \frac{8\tau_S}{V_o B m} \quad (6)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{N_C}{N_T}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\tau_{Ty}}{\tau_{Tx}}\right) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \beta &= \tan^{-1}\left(\frac{N_S}{\sqrt{N_T^2 + N_C^2}}\right) \\ &= \tan^{-1}\left(\frac{\tau_S}{\sqrt{\tau_{Tx}^2 + \tau_{Ty}^2}}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (3)으로 표현되는 전체 공기의 회전유동(angular bulk motion)에 대한 일반화 된 3차원 유동 지수에 있어서 만약 정상 유동실험 시 어떠한 형태의 흡기시스템을 채택한 경우에도 실린더 안으로 유입되는 공기의 회전유동특성을 단순히 스윙 및 텀블 유동으로 분리 할 수 있으며, 이때 텀블유동은 서로 직각한 위치에서 측정된 값의 벡터합성에 의해 식 (9)와 같이 유일하게 정의 될 수 있다면 식 (3), (8)은 아래의 식 (10), (11) 형태로 단순화 할 수 있다.

특히 식 (9)와 같은 최대 텀블계수(N_{Tmax} : maximum tumble coefficient)를 적용한 (11)과 같은 형태의 3차원 유동지수는 이들 지수를 활용한 여러 가지 계산 과정을 매우 단순화 시켜주는 역할을 하게 되므로 매우 중요하다.

$$N_{Tmax} = \sqrt{N_T^2 + N_C^2} \quad (9)$$

$$|\vec{N}_B| = \sqrt{N_{Tmax}^2 + N_S^2} \quad (10)$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{N_S}{N_{TC}}\right) \quad (11)$$

3. Maximum Tumble Coefficient(N_{Tmax})의 설정 타당성 검증 및 3차원 유동지수 계산결과 고찰

앞 절에서 제시한 단순화된 3차원 형태의 유동 지수가 모든 경우에 보편적으로 활용이 되려면 무엇보다 최대텀블 계수(N_{Tmax})가 유일하게 정의된다는 것을 확인해야한다. 이를 위해 먼저 텀블 유동시험에 대한 정상유동시험을 수행하였다.

Table 1은 본 연구에서 사용한 흡기시스템의 제원이다.

Table 1 Specifications of simulation engine

Engine type	4-stroke DOHC
Intake port	Dual symmetric
Bore[mm]	77
Stroke[mm]	89.2
Valve lift [mm]	10

Fig. 2는 타당성 검증을 위해 수행한 텀블유동시험장면을 보여주고 있다. 시험은 흡입공기의 압력차를 6kPa로 일정하게 유지하면서 좌우 흡입밸브 리프트를 각각 2mm씩 10mm까지 움직여 가면서 매 순간 공급유량과 텀블 토크를 측정하였다. 그리고 최대 텀블계수(N_{Tmax})의 유일성 검증을 위해 그림에서 보여주고 있는 Rotation 각도를 0°, ±30°, ±60°, ±90° 씩 바꾸어 가면서 모든 경우에 대해 실험을 수행하였다.

Fig. 3은 회전각도(rotation angle)를 바꾸어 가면서 측정된 텀블 토크값을 좌우흡입밸브 리프트 변

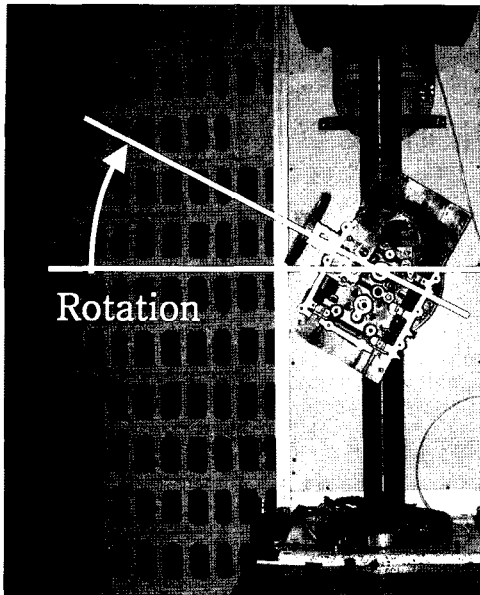


Fig. 2 Photograph of steady flow rig for tumble test

화에 따라 정리한 결과 값이다. 그림에서 알 수 있듯이 시험헤드의 경우 좌우대칭형 DOHC 헤드이므로 회전각도가 0°일 때 텀블 토크가 가장 큰 값을 보여주고 있다. 그리고 Fig. 2에 표기한 회전각도가 증가함에 따라 텀블 토크 값이 급격히 감소하는 경향을 보여준다. 이러한 결과로부터 실린더로 공급되는 흡입공기의 텀블유동 측정값은 측정방향(rotation angle)에 따라 바뀌게 되며, 흡입포트의 형상 및 가변 흡입전략에 따라 텀블 토크 값이 최대가 되는 특정 위치(rotation angle)가 달라질 수 있다는 것을 알 수 있다. 그렇다면 식 (10)에서 사용되는 최대 텀블 토크 값을 찾기 위해 모든 회전각도에서 실험을 하여야 하는가하는 문제가 발생한다. 식 (9)는 단지 회전각도가 서로 직각이 되는 두 위치에서 측정된 결과값(N_b, N_c) 만 있다면 이들 값을 사용하여 최대 텀블 토크 값(N_{Tmax})을 찾을 수 있다는 것을 나타낸다.

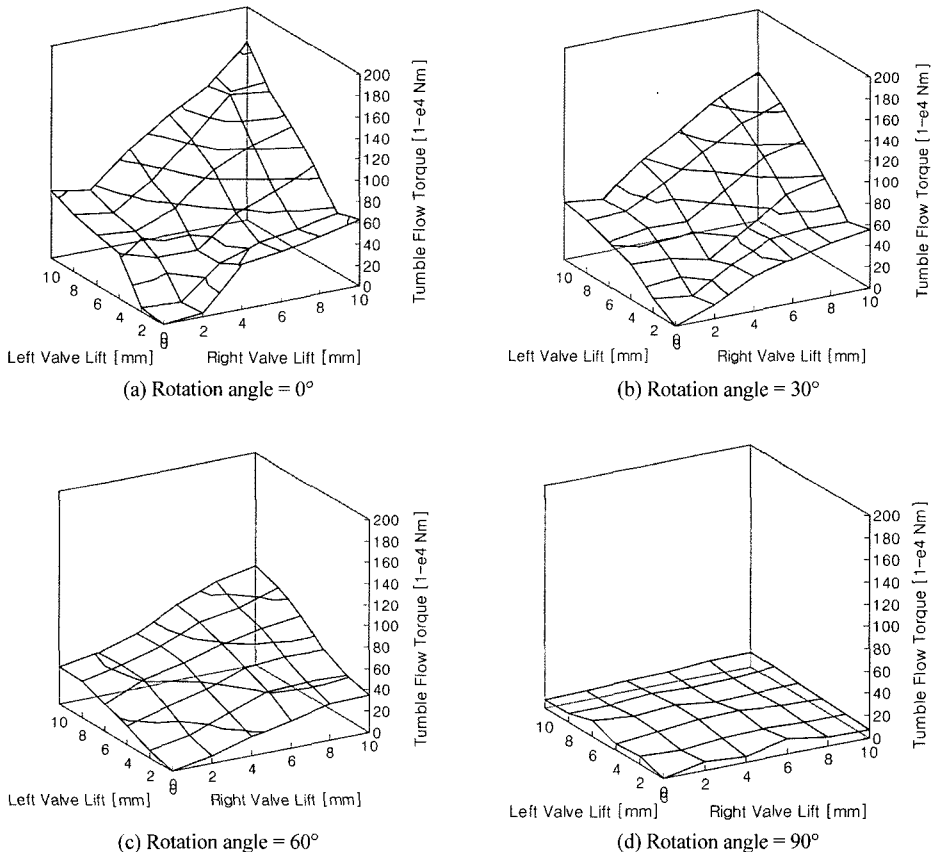
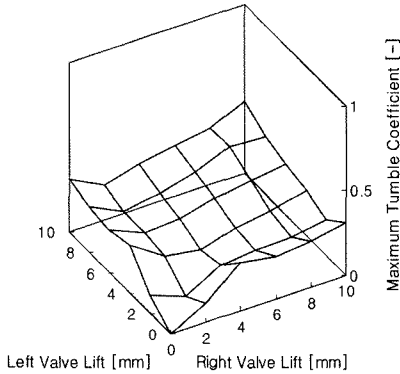
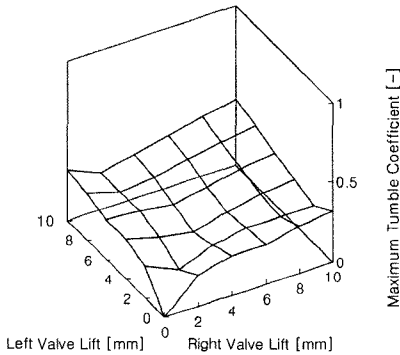


Fig. 3 Variation tumble flow torque due to rotation angle

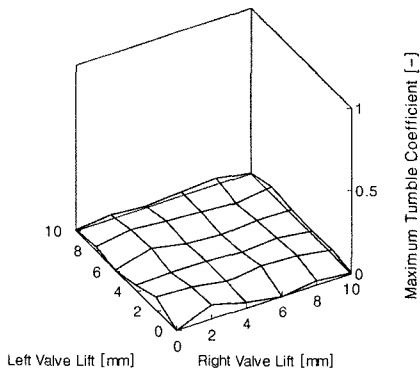
Fig. 4는 식 (9)가 의미하는 단지 회전각도가 서로 직각이 되는 두 위치에서 측정된 텀블 토크 결과 값만 있다면 이들 값을 사용하여 최대 텀블 토크 값을



(a) Using tumble torque measured at rotation angle 0°, 90°



(b) Using tumble torque measured at rotation angle 30°, -60°



(c) Difference between (a) and (b)

Fig. 4 Comparison of maximum tumble coefficient(MTC). (a) MTC calculated by tumble torque measured at rotation angle 0°, 90°. (b) MTC calculated by tumble torque measured at rotation angle 30°, -60°. (c) MTC difference between (a) and (b)

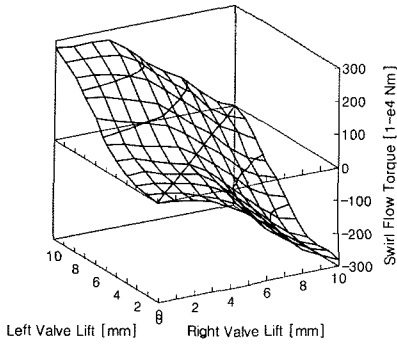
찾을 수 있다는 것을 실험적으로 증명하기 위해 회전각도 0°, 30°, 90°, -60°의 각 위치에서 좌우흡입밸브 리프트 2mm씩 바꾸어 가면서 각 위치에서 측정된 전체 144개의 텀블 토크 값을 사용하여 회전각도가 서로 직각을 이루고 있는 두 가지 경우 (0°, 90°), (30°, -60°)에 대해 식 (9)를 적용하여 계산한 최대 텀블 토크 값의 결과를 보여주고 있다. (a), (b) 두 그림을 살펴보면 (0°, 90°)의 텀블토크 값을 사용하여 36개의 각 위치에서 계산한 경우와 (30°, -60°)의 텀블 토크 값을 사용하여 계산 한 두 경우의 최대 텀블계수 값 사이에는 차이가 거의 없음을 알 수 있다. Fig. 4(c)에는 이들 두 값 사이의 차이를 계산한 결과를 보여주고 있다. 이러한 결과는 회전각이 서로 직교하는 두 위치에서 측정된 값을 사용하여 식 (9)로 계산할 경우 동일한 크기의 최대 텀블계수를 구할 수 있다는 것을 증명하는 결과이다. 그러므로 아무리 복잡한 형태의 유동이 실린더 내로 유도되어 들어온다고 할지라도 회전각(rotation angle)이 서로 직교하는 위치에서 각각 텀블토크 값을 측정만 할 수 있다면 유일한 크기의 최대 텀블계수(N_{Tmax})를 정의할 수 있다.

Fig. 5의 (a)는 동일한 운전 조건에서 측정된 스웰 토크의 측정값이다. 그림의 스웰토크 값을 살펴보면, 한쪽 흡입밸브를 닫아 놓은 채 다른 쪽 밸브만을 열었을 경우에 흡입되는 공기의 각운동량이 가장 커진다는 것을 알 수 있다. 그리고 양쪽 밸브를 다 열었을 경우에는 흡입되는 공기량은 많지만 좌우대칭형의 흡입 포트의 특성으로 인해 스웰토크 값은 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다. (그래프에서 ‘-’값 의미는 회전 방향이 반대라는 것을 의미 한다.)

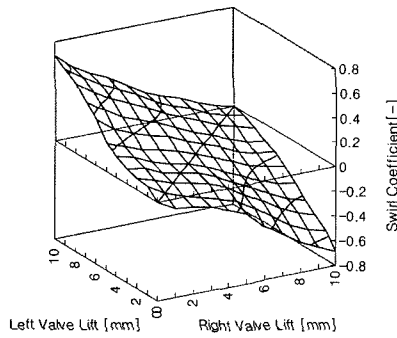
Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)의 스웰토크 값을 사용하여 식 (6)으로부터 계산한 스웰계수의 값이다. 식 (6)에서 알 수 있듯이 스웰계수는 스웰토크의 무차원 값이므로 전체적인 경향은 스웰토크 값과 유사한 형태를 가지게 된다.

Fig. 6은 Fig. 4(a)의 최대 텀블계수 및 Fig. 5(b) 스웰계수 값을 사용하여 식 (10)과 (11)으로부터 계산한 3차원 유동의 회전유동계수($\sqrt{N_{BI}}$) 및 경사각(β)을 계산한 그림이다.

Fig. 6에서 회전유동계수 ($\sqrt{N_{BI}}$)는 흡입시스템을



(a) Swirl flow torque



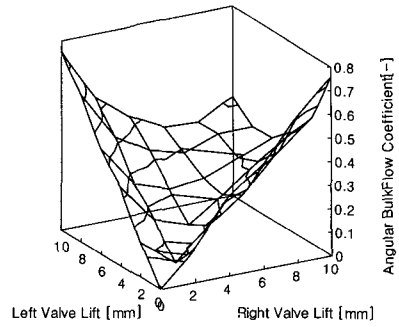
(a) Swirl flow coefficient

Fig. 5 Variation flow torque and swirl coefficient flow torque due to rotation angle

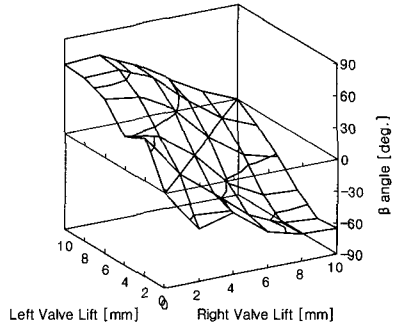
통해 실린더 내로 유도되는 흡입공기의 실린더 내 전체 공기의 회전운동(angular bulk motion)의 무차원화한 각 회전수를 의미하며 1차적으로 정상 유동 시험 장치에 사용하여 측정된 토크 값으로부터 유도할 수 있는 3차원 유동지수로 활용할 수 있다. 그리고 bulk motion의 회전각 β 값은 흡입유동특성에서 텀블에 대한 스웰 성분의 비(ratio)로 이해할 수 있으므로 매우 중요한 의미를 가진다. 즉 $|\beta|$ 값이 45° 보다 큰 값을 가진다는 것은 실린더로 유도된 흡입유동의 회전성분 중 스웰 성분이 텀블 성분보다 우세하다는 의미로 해석할 수 있기 때문이다.

4. 결론

본 연구는 정상유동 시험장치를 사용하여 측정할 수 있는 스웰 및 텀블 토크값($\tau_s, \tau_{Tx}, \tau_{Ty}$)으로부터 흡기 시스템에 유도되는 흡입공기의 회전유동특성을 표현할 수 있는 일반화된 3차원 유동지수를 제시하고자 수행하였다. 이상의 연구과정을 통해 아래와



Left Valve Lift [mm] Right Valve Lift [mm]



Left Valve Lift [mm] Right Valve Lift [mm]

Fig. 6 Variation of angular bulk flow coefficient($\overline{N_B}$) and β inclination angle

같은 결론을 얻었다.

- 1) 흡기 시스템에 유도되는 흡입공기의 회전유동 특성을 표현할 수 있는 일반화된 3차원 회전유동 지수로 회전유동계수($\overline{N_B}$: angular bulk flow coefficient) 및 경사각(β : inclination angle)을 제안하였다.
- 2) 제안한 회전유동계수($\overline{N_B}$)는 흡입시스템을 통해 실린더 내로 유도되는 흡입공기의 실린더 내 전체 공기의 회전운동(angular bulk motion)의 무차원화한 각 회전수를 의미한다.
- 3) 제안한 회전각 β 값은 흡입유동특성에서 텀블에 대한 스웰 성분의 비(ratio)로, $|\beta|$ 값이 45° 보다 큰 값을 가진다는 것은 실린더로 유도된 흡입유동의 회전성분 중 스웰 성분이 텀블 성분보다 우세하다는 것을 의미하며, 45° 작다는 것은 텀블 성분이 스웰 성분보다 우세하다는 것을 뜻한다.
- 4) 일반화된 3차원 유동지수 ($\overline{N_B}$)에 있어서 최대 텀블계수(N_{Tmax})는 서로 직각한 위치에서 측정된 값의 벡터합성에 의해 유일하게 결정된다.

References

- 1) T. G. Baker and C. J. E. Nightingale, "Port Throttling and Port De-activation Applied to a 4-Valve SI Engine," SAE 960587, pp.87-99, 1996.
- 2) B. Johansson and F. Soderberg, "The Effect of Valve Strategy on In-Cylinder Flow and Combustion," SAE960582, pp.33-48, 1996.
- 3) 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, pp.729-740, 1991.
- 4) J. C. Lee, C. W. Lee and A. Nitkiewicz, "The Application of a Lost Motion VVT System to a DOHC SI Engine," SAE950816, pp.189-198, 1995.
- 5) Y. Han, K. Hwan and K. Lee, "An Experimental Study on the Measurement of Flow Field in a Direct Diesel Engine Using a Single Cylinder Visualization Engine," Transactions of KSAE, Vol.14, No.1, pp.129-137, 2006.
- 6) J. Kim, J. Lee and J. Ha, "The influence of Mixture Flow and the Ignition Conditions on the Initial Flame Propagation Characteristics," Transactions of KSAE, Vol.7, No.6, pp.57-64, 1999.
- 7) J. E. Yun, "New Evaluation Index for Bulk Motion of In-Cylinder Flow through Intake Port System in Cylinder Head," ImechE, Part D, Journal of Automobile Engineering, Vol.216, pp.513-521, 2002.
- 8) J. E. Yun, "A Study on Combined Effects between Swirl and Tumble Flow of Intake Port System in Cylinder Head," Transactions of KSAE, Vol.7, No.8, pp.76-82, 1999.