

엔진대상시험을 통한 텀블측정방식의 상관성 및 유의성에 관한 연구

이 시 훈¹⁾ · 김 명 진²⁾

현대자동차¹⁾ · 텍사스주립대²⁾

Correlations among Different Tumble Measuring Methods and Significance of Tumble Ratios from Steady Flow Rig on SI Engine Combustion

Sihun Lee^{*1)} · Myoungjin Kim²⁾

¹⁾Gasoline Engine Test Team, Hyundai Motor Company, 772-1 Jangduk-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-706, Korea

²⁾ME and IE Department, The University of Texas at El Paso, 500 W University Avenue, El Paso, Texas 79968, USA

(Received 2 February 2006 / Accepted 21 June 2006)

Abstract : Optimizing in-cylinder flow such as tumble or swirl is one of the key factors to develop better internal combustion engines. Especially, the tumble, which is more dominant flow in current high performance gasoline engines, has significant effects on the fuel consumptions and exhaust emissions under part load conditions. The first step for the tumble optimization is to find an accurate but cost-effective way to measure the tumble ratio. From this point of view, tumble ratios from three different measuring methods were compared and correlated in this research. Steady flow rig, water rig, and PIV were utilized for that purpose. Engine dynamometer test was also performed to find out the effect of the tumble. The results show that the tumble ratios from those methods are well correlated and that the steady flow rig is the effective method to measure the tumble despite its limitations.

Key words : SI Engine(가솔린 엔진), Port(포트), Tumble(텀블), Steady flow rig(정상유동리그), Combustion(연소)

1. 서 론

배기ガ스 저감과 연비 향상을 위하여 가솔린 엔진 분야에서 최근에 도입되고 있는 신기술로는 가변밸브시스템, 직접분사(GDI), 저온배기ガス순환(Cooled EGR) 등이 있으며, 이러한 신기술의 장점을 최대한 확보하기 위하여 많은 연구 기관에서 엔진 실린더 내부 유동과 연소 특성을 정확히 파악하고 최적화하는 연구에 매진하고 있다. 실린더 내부 유동은 엔진의 연소 특성을 제어하는 가장 효과적인 수단 가운데 하나로서, 연료-공기의 균질 혼합, 성층화, 화염의 형성 및 전파에 대한 특성들이 전체적으로 혹은 부분적으로 스월(Swirl)이나 텀블(Tumble)

과 같은 실린더 내부 유동에 지배를 받게 된다.¹⁾ 고 성능을 지향하며 실린더 당 두개의 흡기 밸브를 장착한 현재의 일반적인 가솔린 엔진의 경우에는 스월보다 텀블이 성능에 더 큰 영향을 주게 된다.

대부분의 자동차 제조사 및 엔진 연구 기관들은 자체적으로 텀블 측정을 위한 장치를 운용하고 있는데, 가장 간단한 정상 유동 리그(Steady Flow Rig)의 경우에도 세부적으로는 서로 차이점을 갖고 있다. 이것은 다른 기관에서 다른 방식으로 측정된 텀블값을 서로 비교하거나 호환하여 사용하는 것은 불가능하다는 것을 의미한다.

정상 유동 리그는 엔진 밸브 리프트(Lift)를 적절히 분할하여 각각의 리프트에서 정상 텀블 유동을 측정하는 방식으로, 실제 엔진의 텀블을 정확히 반

*Corresponding author, E-mail: sihun4u@hyundai-motor.com

영하지 못할 수 있음에도 불구하고 텀블을 측정하는 가장 쉽고 저렴하면서 빠른 방법으로 알려져 있다.^{2,3)} 반면에 다차원 유동 측정 방법인 PIV (Particle Image Velocimetry), PTV (Particle Tracking Velocimetry), LDV (Laser Doppler Velocimetry) 등은 광학적인 수단을 통해 직접 실린더 내부 유동장에 접근하여 유동을 측정하는 기술이다. 물론 엔진 속도, 연소 여부와 부하, 온도 및 운전 시간에 따른 제약이 없진 않으나, 실린더 내부 텀블을 비교적 정확하게 측정할 수 있는 방법이다.^{2,4)} 그러나 이러한 광학적 기술을 엔진에 적용하는 것은 정상 유동 리그에 비해 엄청난 비용과 시간을 필요로 한다.

이와 같은 배경에서 본 연구의 목적은 첫째 서로 상이한 방식으로 측정된 텀블값들 간의 상호 상관성을 파악하여 각 방식의 적용 범위를 뚜렷이 하는 것이고, 둘째 이를 통해 결정된 텀블이 실제 엔진 연소에 미치는 영향을 정량적으로 분석해 보면서 측정된 텀블값의 유의성을 살펴보고자 하는 것이다.

2. 시험 방법

본 연구에서는 4가지 수준의 텀블 흡기 포트를 제작하여 현대자동차의 2.0리터 베타 엔진에 적용하였다. 이러한 텀블을 측정하기 위해 3가지의 상이한 측정 방식을 선정하였는데 이는 정상 유동 리그, 물을 매체로 PTV를 적용하는 워터리그, 그리고 PIV이다. 다음으로 측정된 텀블의 강도가 엔진 연소에 실제 어느 정도의 영향을 미치는지, 즉 유의한 수준의 텀블이 측정되었는지를 파악해 보기 위해 엔진 대상(Dynamometer Bench) 시험을 수행하였다. 이 진행되었다. 실린더 헤드간 편차를 방지하기 위하여 동일한 실린더 헤드에 MTV(Manifold Throttling Valve)를 개폐하여 텀블을 변화시키면서 연소 압력 특성, 연료소비율(BSFC: Break Specific Fuel Consumption), 배기가스를 측정하고 분석하였다.

2.1 정상 유동 리그

Fig. 1은 본 연구에 사용된 정상 유동 리그 장치를 묘사하고 있다.

먼저 공기 흡입 벤치를 사용하여 실린더 내부에 부압을 인가하면 장착된 실린더 헤드의 포트를 통

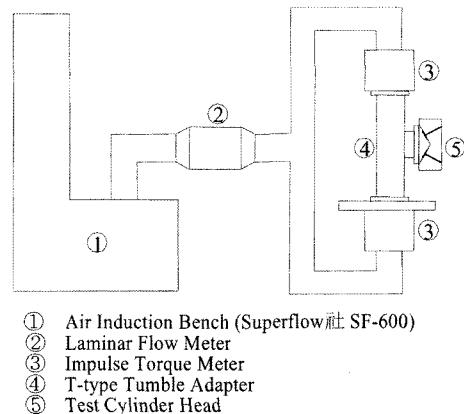


Fig. 1 Steady flow rig for tumble ratio measurement

해 공기가 유입되면서 텀블 유동이 발생하게 된다. 본 연구에서는 실린더 내부 부압을 25 inH₂O로 유지하였다. 포트에 의해 형성된 텀블 유동은 특별히 고안된 T형 어댑터를 통해 임펄스 토크미터로 유도되어 텀블 유동의 토크가 측정된다. 이때 어댑터의 양단으로 분리되는 텀블이 비대칭인 경우를 고려하여 양단 모두에 임펄스 토크미터를 부착하였다. 최종 텀블비(Tumble Ratio)는 양단의 임펄스 토크미터의 평균값과 장착된 종류 유량계에서 측정된 유량으로 계산된다. 텀블과 유량의 측정은 최대 밸브리프트까지 1mm 단위로 수행한 뒤 밸브 리프트 곡선을 이용해 전체 밸브 열림 구간 동안의 텀블비를 계산하였다.

2.2 워터리그

워터리그는 공기 대신 물을 매체로 하여 실제 엔진의 작동을 동적 및 기하학적으로 상사한다.⁵⁾ 비압축성인 물을 매체로 한다는 점에서 실린더 내부 유동은 흡기 과정 중에서만 측정될 수 있다. 즉 흡기 하사점(BDC)에서 두 대의 CCD 카메라에 의해 5개의 연속적인 실린더 내부 유동장을 200 사이클(Cycle) 동안 촬영한 다음 PTV 알고리듬을 이용하여 3차원 데이터로 재구성한다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 워터리그 장치를 보여주고 있다. 본 장치의 실제 혼용 엔진 회전수는 최대 1500RPM 이지만 높은 속도에서는 피스톤 링과 같은 소모품의 수명이 짧아지므로, 본 실험의 경우 엔진회전수 800 RPM을 상사하여 구동하였고 이는 워터리그 회전수로 약

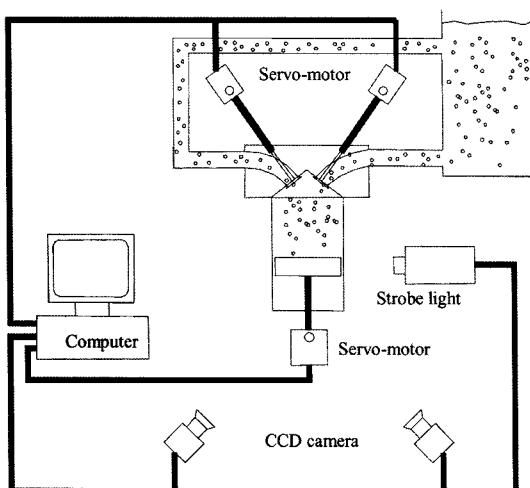


Fig. 2 Water rig using 3-dimensional PTV

12.4RPM에 해당된다. 이때 흡기매니폴드 압력은 40kPa로 하였다.

2.3 PIV

PIV는 평면 유동장을 일정한 시간 간격을 두고 연속적으로 촬영한 다음, 통계적인 처리를 통해 2차원 속도장으로 재구성하는 것이다. Fig. 3은 본 연구에 사용된 2차원 PIV 장치를 묘사하고 있다. 광원으로 Nd-Yag 레이저(Laser)가 사용되었고, 촬영은 $10\mu\text{m}$ 간격으로 이루어졌다. 모두 3개의 실린더 단면 유동장이 엔진 운전 조건 1200RPM/50kPa, 2000 RPM/40kPa, 2000RPM/60kPa, 크랭크(Crank) 각 상사점후(ATDC) 60, 120, 180, 240, 300도에서 10 사이클 동안 촬영되고 후처리 되었다. 상기 엔진 운전 조

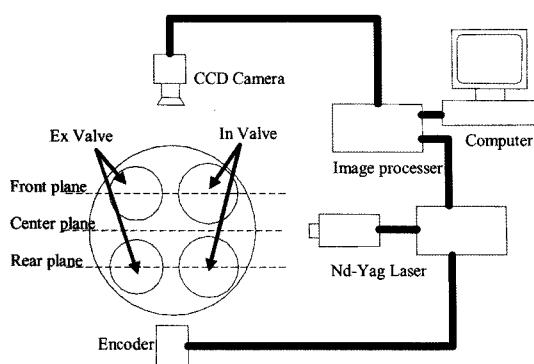


Fig. 3 2-Dimensional PIV measurement system

건에서 압력은 흡기 매니폴드(Manifold) 압력을 나타낸다.

2.4 엔진 대상 시험

시험 엔진은 AC 동력계(AC Dynamometer)로 구동하였고, 연소 압력은 모두 200 사이클 동안 측정되었다. 엔진 운전 조건은 엔진회전수(RPM)/BMEP (bar)로 1600/4.0, 1800 /2.0, 1800/4.0, 2000/2.0, 2000 /4.0, 2400 /2.5 이다.

3. 시험 엔진

본 연구에 사용된 엔진의 제원이 Table 1에 나타나 있다.

Table 1 Test engine specification

Engine	HMC Beta 2.0L	
Displacement (cc)	1975	
Bore (mm)	82.0	
Stroke (mm)	93.5	
Valve Timing	IVO	BTDC 9° CA
	IVC	ABDC 43° CA
	EVO	BBDC 50° CA
	EVC	ATDC 6° CA

먼저 텀블 측정 방식에 대한 상관성을 이해하기 위하여 Fig. 4에서 보이는 바와 같이 4가지 종류의 흡기 포트가 제작되었는데 주로 포트 상면부 곡률을 변경하여 텀블을 변화시킨다.

다음으로 엔진 대상 시험을 위해서 상기 헤드의 베이스 사양에 MTV를 장착하였다. 앞서 제작한 포트 변경 헤드를 사용하지 않은 것은 텀블 이외의 요

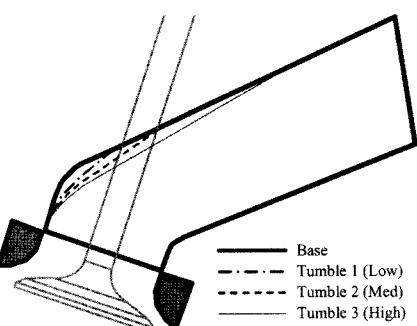


Fig. 4 Intake port modification for the different tumble ratios

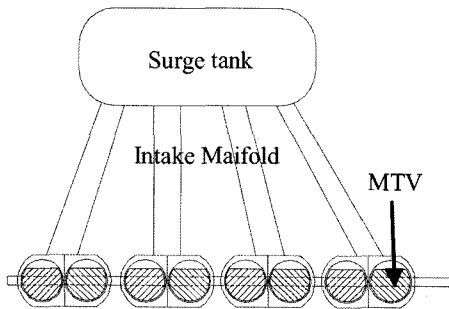


Fig. 5 MTV system for controlling the tumble ratio

소, 즉 헤드간의 편차에 의해 연소특성이 왜곡되는 현상을 방지하기 위해서이다. MTV를 닫아 유로의 하단부를 막으면 유동이 포트의 상부로만 집중되어 텁블이 증가하게 된다. Fig. 5는 흡기 매니폴드에 장착된 MTV를 묘사하고 있다.

4. 시험 결과

Table 2는 언급한 3가지 방식에 따라 측정된 4가지 포트에 대한 텁블비를 나타내고 있다.

Table 2 Test engine specification

Port	Base	Tumble1	Tumble2	Tumble3
Steady rig	0.60	0.83	0.97	1.08
Water rig	0.35	0.5	0.75	1.00
PIV_1 ^{a)}	1200 / 50 ^{c)}	0.18	0.63	0.83
	2000 / 40 ^{c)}	0.30	0.79	1.06
	2000 / 60 ^{c)}	0.13	0.78	1.17
PIV_2 ^{b)}	1200 / 50 ^{c)}	0.22	0.44	0.91
	2000 / 40 ^{c)}	0.29	0.70	1.16
	2000 / 60 ^{c)}	0.31	0.59	1.32

a) Averaged over 3 cross planes and 5 crank phases

b) Averaged over 3 cross planes and BDC crank phase only

c) Engine speed (RPM) / Intake manifold pressure (kPa)

엔진 대상 시험용 헤드의 MTV 개폐에 따른 텁블비는 워터리그에서 측정이 되었다. MTV를 열 경우 0.4, 닫을 경우 0.7로서 Table 2에 따르면 정상 유동 리그의 텁블로 대략 0.7과 0.9에 해당한다.

4.1 정상 유동 리그 대 워터리그

정상 유동 리그에서 밸브 리프트별로 측정된 텁블은 먼저 식 (1)에서 무차원텀블계수로 나타낼 수

있다. 무차원텀블계수는 유동의 접선속도와 이상속도와의 비로 정의된다. 여기서 접선속도는 측정된 유동의 토크와 관성모멘트(Moment of Inertia)로부터 구할 수 있다.²⁾

$$N_r = \frac{8M}{\dot{m} V_0 B} \quad (1)$$

N_r : 무차원텀블계수

M : 임펄스 토크미터 출력 (토크)

\dot{m} : 측정 유량

V_0 : 이론속도

B : 실린더 보어

전체로서의 텁블비, 즉 엔진 1회전에 대한 텁블비는 실린더 내부 유동이 강체회전운동(Solid Body Rotation)을 한다는 가정에 따라 식 (2)에서 엔진과 유동의 각속도 비로 정의된다.

$$R_t = \frac{\text{Charge Angular Velocity}}{\text{Engine Angular Velocity}} \quad (2)$$

앞서 계산한 무차원텀블계수를 이용하여 텁블비를 구하기 위해서 식 (1), 식 (2)는 식 (3)으로 변환되며, 이것은 각 밸브 리프트에서의 무차원스월계수와 유량으로 전체 스월비를 계산하는 과정을 텁블비 계산에 적용한 것이다.³⁾

$$R_t = \frac{L_d \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_f N_r d\alpha}{\left(\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} C_f d\alpha \right)^2} \quad (3)$$

$$L_d = \frac{BS}{nv Dv^2} \quad (4)$$

R_t : 텁블비

C_f : 유량계수

L_d : 형상계수

S : 스트로크

nv : 흡기밸브 개수

Dv : 흡기밸브 경

α_1 : 흡기밸브 열림 크랭크 각

α_2 : 흡기밸브 닫힘 크랭크 각

다음, 워터리그의 텁블비는 식 (5)와 같이 정의되며 기본적으로 식 (2)와 같다.⁴⁾

$$R_t = \frac{\int_v \rho(\vec{r} \times \vec{V}) \cdot i dv}{w \int_v \rho(\vec{r} \times \vec{r}) dv} \quad (5)$$

Fig. 6은 정상 유동 리그와 워터리그의 텀블비 사이의 상관성을 나타내고 있다. 선형 적합성(Linear Fitting)을 보면 상관계수 R^2 (coefficient of determination)⁶⁾가 0.92로서 상관성이 높음을 알 수 있다.

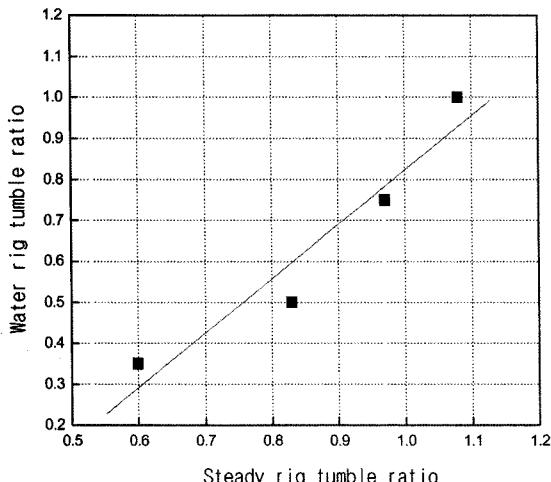


Fig. 6 Tumble ratio correlation between the steady rig and the water rig

4.2 정상 유동 리그 대 PIV

PIV의 텀블비 정의는 식 (5)와 동일하다. 다만 PIV 측정이 5개의 서로 다른 크랭크 각에서 수행되었으므로, 텀블의 중심축이 피스톤(Piston) 위치에 따라 이동하는 점을 고려하였다. 정상 유동 리그와 PIV의 텀블비 간의 상관성이 Fig. 7에 나타나 있다. 이 때 PIV의 텀블비는 Table 2에서 3개면과 5개의 피

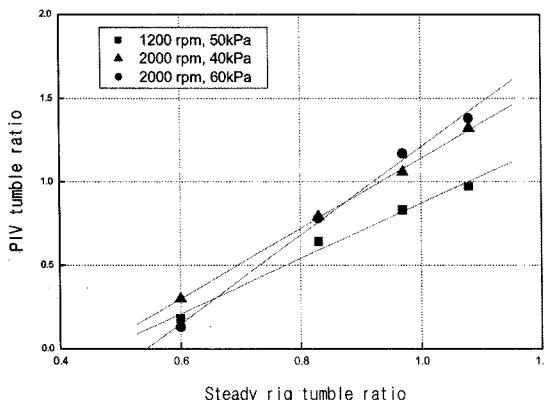


Fig. 7 Tumble ratio correlation between the steady rig and the 2-D PIV

스톤 위치에 따른 텀블비를 모두 평균한 PIV_1을 사용하였는데, 이는 정상유동리그의 텀블비가 피스톤의 위치를 특정하지 않고 전체 실린더를 대상으로 한다는 점을 고려한 것이다.

PIV의 텀블비는 엔진 회전수가 1200에서 2000 RPM으로 변할 때 증가하는 경향을 보인다. 그러나 이 텀블비는 엔진 부하가 40에서 60kPa로 증가할 때는 큰 변화를 보이지 않는다. 또한 각 운전조건에서 두 방식 간 텀블비 상관계수 R^2 가 모두 0.99 이상으로 거의 완벽한 상관성을 나타낸다.

4.3 PIV 대 워터리그

Fig. 8은 PIV와 워터리그의 텀블비 상관성을 나타내고 있다. 언급한 바와 같이 워터리그 텀블비는 흡기 하사점에서 측정된 결과이므로, Table 2에서 흡기 BDC의 피스톤 위치에서 3개면에 대한 텀블비를 평균한 PIV_2를 PIV 텀블비로 사용하였다.

시험 결과를 보면 PIV와 워터리그 간 텀블비 상관계수 R^2 가 0.99로 매우 높은 상관성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

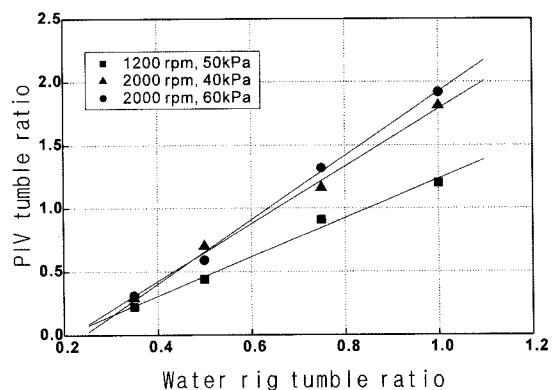


Fig. 8 Tumble ratio correlation between the water rig and the 2-D PIV

4.4 엔진 시험

Fig. 9는 각 운전 조건에서 텀블 증가에 따른 MBT(Minimum spark advance for Best Torque) 변화를 나타내고 있다. 텀블비 0.7의 경우 연소 속도 증가에 의해 MBT가 약 6~9도 지각됨을 보여준다.

Fig. 10은 텀블에 따른 연료소비율 변화를 나타내고 있다. 텀블비가 증가해도 연료소비율은 거의 개

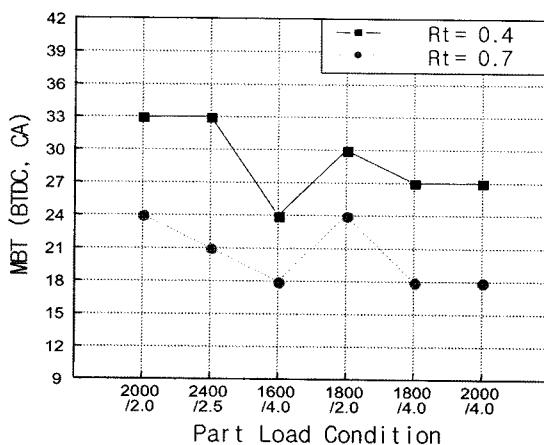


Fig. 9 MBT spark timing under part load conditions

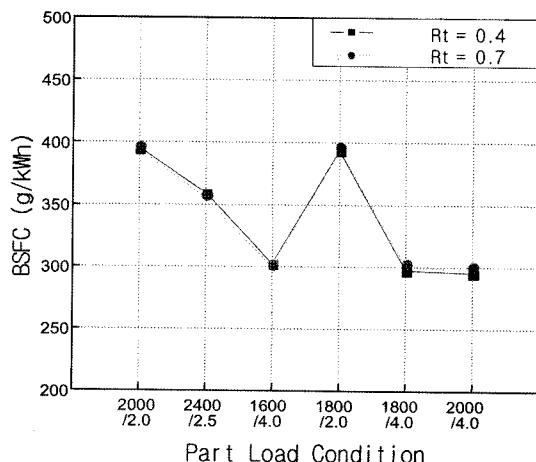


Fig. 10 Fuel consumptions under part load conditions

선되지 않음을 알 수 있는데 이는 연소 속도 증가에 따른 열효율 개선이 최고 압력 상승에 따른 열손실 증가로 상쇄되기 때문으로 보인다.

Fig. 11은 텁블에 따른 배기ガ스 변화를 나타내고 있다. 텁블비가 증가해도 탄화수소(HC)는 거의 동등한 반면 질소산화물(NOx)은 최대 87% 정도까지 증가한다. 이는 텁블 증가에 따른 최고 압력 및 최고 온도 상승에 의한 결과로 볼 수 있다.⁷⁾

텅블에 따른 도시평균유효압력 (IMEP : Indicated Mean Effective Pressure)과 연소 최고 압력(Peak Pressure)이 Fig. 12에 나타나 있다. 이때의 IMEP는 펌핑 손실을 제외한 값으로, 텁블 증가에 따라 거의 변하지 않는다. 이것은 언급한 바와 같이 연소 속도 증가와 열손실 악화에 따른 효과가 상쇄되어 전체

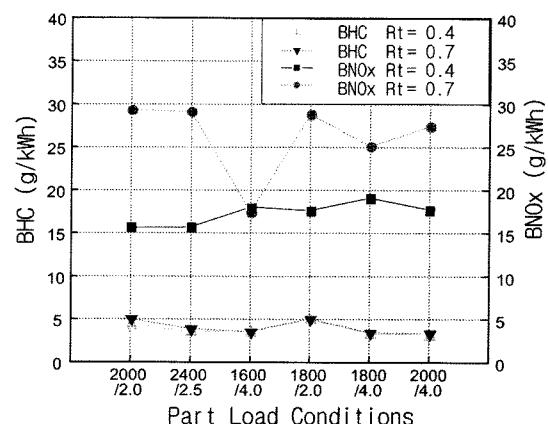


Fig. 11 Exhaust emissions under part load conditions

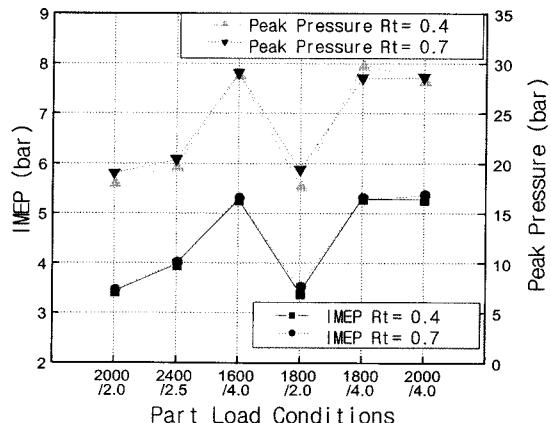


Fig. 12 IMEP and peak combustion pressure variation

적인 열효율은 동등하게 나타나는 것을 보여준다. 최고 압력은 텁블 증가에 따라 대부분 증가하며 그 폭은 대략 5% 정도이다.

Fig. 13은 텁블에 따른 연소 속도 변화를 보여주고 있는데, 각각 0 ~ 10% 및 10 ~ 90%의 연소구간 (Burn Duration)을 크랭크 각으로 나타낸 것이다. 두 연소구간이 모두 텁블 증가에 따라 감소하므로 연소 속도가 빨라졌음을 알 수 있다. 특이하게도 주 연소구간의 단축은 약 7 ~ 12%이나 초기 연소구간은 약 20 ~ 30% 단축된다. 즉 텁블 증가는 주 연소구간보다 초기 화염 전파의 단축에 더 큰 효과가 있음을 보여준다.

Fig. 14는 2000RPM/2.0bar에서 공연비(A/F) 변화에 따라 측정된 연소 압력과 연료소비율을 나타내고 있다. 점화 시기는 MBT로 유지되었다. IMEP 결

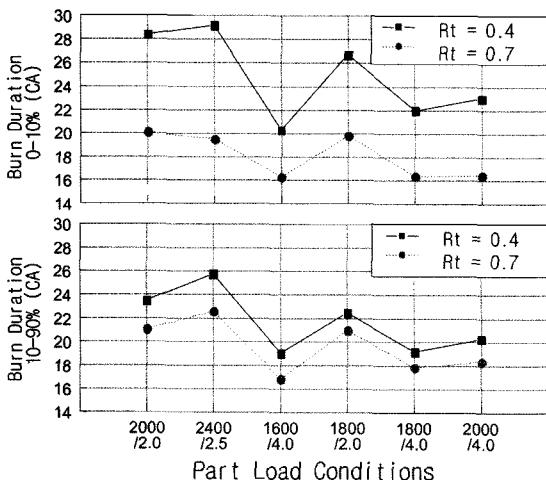


Fig. 13 Burn duration variation (0~10% and 10~90%)

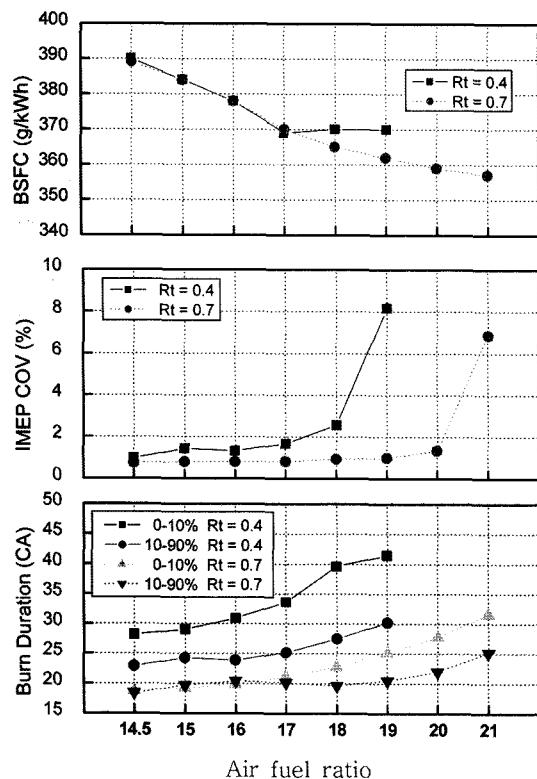


Fig. 14 Lean limit variation due to tumble increase

과를 보면 텀블이 증가함에 따라 희박한계(Lean Limit)가 공연비 19:1에서 21:1로 확장됨을 알 수 있다. 즉 텀블 증가에 따라 희박 공연비에서도 연소속도의 증가에 따라 훨씬 더 안정적인 연소가 가능하며, 그 결과로 공연비 17:1 이상에서 연료소비율이

개선됨을 알 수 있다. 본 연구에서 희박 한계의 정의는 IMEP COV가 5%를 초과하는 공연비이다.

5. 결 론

- 정상 유동 리그에서 도출된 텀블비는, 실엔진의 텀블에 보다 근접하다고 할 수 있는 다차원 유동 가시화 방식에서 도출된 텀블비와 높은 상관성을 보여 주었다. 따라서 정상 유동 리그로 엔진의 텀블비를 쉽고 저렴하며 신속히, 그리고 비교적 정확하게 측정할 수 있다.
- 정상 유동 리그에서의 텀블비 차이가 엔진 연소에 미치는 영향은 주로 초기 연소 속도의 증가와 NOx의 증가로 나타났으며, 엔진의 희박한계를 확장하였다. 즉 정상 유동 리그로 측정된 텀бл비는 엔진의 연소를 대별할 수 있는 충분한 유의성을 갖고 있다고 할 수 있다.

References

- I. Ohm and Y. Cho, "In-Cylinder Fuel Behavior According to Fuel Injection Timing and Port Characteristics in an SI Engine : Part II-With Low/Medium Swirl," Transactions of KSAE, Vol.9, No.3, pp.9-17, 2001.
- H. Xu, "Some Critical Technical Issues on the Steady Flow Testing of Cylinder Heads," SAE 2001-01-1308, 2001.
- Ricardo, Steady State Flow Bench Port Performance Measurement and Analysis, Report DP93/0704, 1993.
- W.-C. Choi and Y. G. Guezenne, "Study of the Flow Field Development During the Intake Stroke in an IC Engine Using 2-D PIV and 3-D PTV," SAE 1999-01-0957, 1999.
- A. R. Denlinger, Y. G. Guezenne and W.-C. Choi, "Dynamic Evolution of the 3-D Flow Field During the Latter Part of the Intake Stroke in an IC Engine," 980485, 1998.
- J. L. Devore, Probability and Statistics for Engineering and the Sciences, Brooks/Cole, 1991.
- J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, 1988.