

이색 PIV 기술을 이용한 5밸브 가솔린엔진 연소실 내의 유동특성 분석

이기형[†] · 우영완^{*} · 박상찬^{*} · 이창식^{**}
(2001년 6월 12일 접수, 2001년 11월 5일 심사완료)

Investigation on the In-Cylinder Flow of 5-Valve Gasoline Engine by Using Two Color PIV Method

Kihyung Lee, Youngwan Woo, Sangchan Park and Changsik Lee

Key Words: Two Color PIV(이색 PIV), Tumble Ratio(텀블비), Tumble Control Valve(텀블 제어 밸브),
Laser Sheet(레이저 쉬트), Impulse Tumble Meter(텀블 측정 장치)

Abstract

A 5-valve(intake 3-valve) engine has been developed to increase engine performance. These engines have a high power caused by the decrease of inertia mass of an intake valve and the increase of intake effective area. In this study, in-cylinder flow patterns were visualized with laser sheet method and velocity profiles at near intake valves were inspected by using a two-color PIV. In addition, steady flow tests were performed to quantify tumble ratio of flow-fields generated by a tumble control valve(TCV). Experimental results of steady flow test show that the curve of tumble ratio in intake 3-valve engine formed as a S shape with valve lift changes. This tendency is different from the one in intake 2-valve engine. Using laser sheet method and two color PIV method, we can find that the intake flow through upper valve increases and the velocity gradient also slightly increases as valve lift increases. From this study, the in-cylinder flow characteristics around intake valves were made clearly.

1. 서론

현재 가솔린 엔진의 연소실 형상으로는 4밸브가 주축을 이루고 있으며, 4밸브 엔진의 연소실 형상에 대한 설계 기술은 국내에서도 어느 정도 확립되어 있는 실정이다. 그러나 좀더 향상된 출력 성능과 연비 저감을 위하여 5밸브 엔진에 대한 연구가 진행되고 있으며,⁽¹⁾ Toyota 자동차의 Carina, Audi의 A4등과 같은 5밸브 엔진의 차량이 시판되기 시작하였다. 일반적으로 엔진의 출력을 향상시키기 위하여 실린더 직경의 증가에 의한 흡기 밸브의 개구 면적을 증가시키는 것이 효과

적인 방법으로 알려져 있지만, 이와 같은 직경의 증가는 연소시 화염 전파 특성을 악화시키고 연소 안정성을 저감시키며 연소실의 표면적 증가로 인하여 냉각 손실의 증가를 초래한다. 반면 흡기 3밸브 엔진은 실린더 직경의 증가 없이 밸브 개수를 늘임으로써 밸브 개구 면적을 증가시킬 뿐만 아니라 연소실의 점화 플러그 및 인젝터 위치의 자유도를 증가시키고 흡기 밸브의 관성 질량을 저감시켜 보다 효율적인 출력 증가를 도모할 수 있는 방법으로 알려져 있다.⁽²⁾ 또한 최근에는 연소실내에 발생하는 유동장의 제어를 통하여 압축행정 말기 연소실내의 난류강도를 증가시켜 연소 안정화와 효율을 증가시키고자 하는 방법이 연구되고 있다.⁽³⁾ 따라서 흡기 3밸브 엔진의 연소실 형상 최적화를 위하여는 흡기 과정에 생성되는 유동의 해석 및 평가와 이를 통해 보다 효과적인 유동 제어 방법을 모색할 필요성이 대두되고 있다.

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한양대학교 기계공학과

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과

E-mail : hylee@hanyang.ac.kr

TEL : (031)400-5251 FAX : (031)406-5550

본 연구에서는 연소실내에 생성되는 유동장을 제어하는 방법으로 텀블 제어 밸브(tumble control valve, 이하 TCV)를 사용하여 텀블 유동을 강화한 후, 정상유동 실험을 통하여 텀블비 형태로 정량화 하였으며, 아르곤 레이저를 이용한 가시화 실험을 수행하여 실린더내의 유동을 정성적으로 해석하였다. 또한 공간 분해능이 좋고 방향 판별성이 우수한 이색 PIV 시스템을 개발하여, 흡기밸브 근처의 흡입 유동의 유속 분포를 측정하였으며 이를 통하여 밸브 주위의 유동과 텀블비 특성과의 상호관계를 해석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 정상유동 실험

본 실험에 사용한 흡기 3밸브 실린더 헤드는 유동 실험을 위하여 특수 제작한 것으로서 그 형상은 Fig. 1과 같이 직경은 83mm이고, 3개의 흡기 밸브 직경은 26mm로 같으며 연소실은 펜트루프(pent-roof) 형상이다. 이러한 대칭형 실린더 헤드는 스웜유동 보다는 텀블유동 생성에 유리한 소질을 가지고 있는 형상임을 이미 다른 논문에서 밝히고 있으므로,⁽⁴⁾ 본 연구에서는 텀블의 측정과 평가만을 수행하였다. 실험에 사용된 텀블 제어 밸브는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 흡기포트 아래 부분을 1/3가량 차단하는 형태의 밸브를 부착하여 실험을 수행하였다.

정상상태에서의 흡입공기 유량의 측정은 출력의 예측 면에서만뿐만 아니라 실린더내 유동의 텀블비 측정을 위하여도 필수적이므로, 본 연구에서는 흡입 행정 중의 엔진상태를 모사할 수 있는 정상유동 실험장치와 오리피스 유량계를 제작하여 일정 차압법으로 실험하였고 이러한 실험 장치의 개략도를 Fig. 3에 도시하였다. 정상 유동 실험을 통하여 텀블을 측정하는 방법에는 여러가

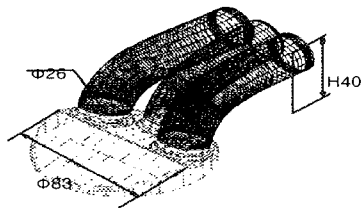


Fig. 1 Configuration of intake port and combustion chamber

지 방식이 사용되고 있으나, 본 연구에서는 각운동량 측정법을 이용하였다.⁽⁵⁾

2.2 레이저 시트법을 이용한 가시화 장치

정상유동 실험만으로는 흡기 3밸브 엔진의 흡입유동 해석과 흡기 3밸브 헤드의 설계변수를 파악하는 데에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 정상유동 실험결과와 레이저 시트법(laser sheet method)을 이용한 흡입 유동장의 가시화 결과를 비교하였다. 실험에 사용된 가시화 실험장치의 주요 구성은 Fig. 4에 나타낸 것처럼 광원부로서 수냉식 아르곤 이온 레이저(5W, LEXEL사)를 사용하였으며, 광파이버(OZ OPTICS사), 산란입자 공급장치, 영상취득 장치로서는 CCD카메라(Megaplus ES1.0 1018× 1008, Kodak사)를 사용하였다. 산란입자로는 평균입경 80μm의 micro balloon을 사용하였으며, CCD의 노출시간은 산란입자의 궤적이 잘 나타나도록 1/30초로 고정하였다.

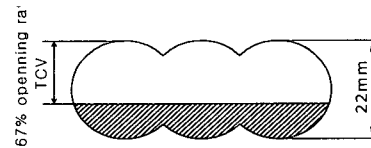


Fig. 2 Configuration of a tumble control valve

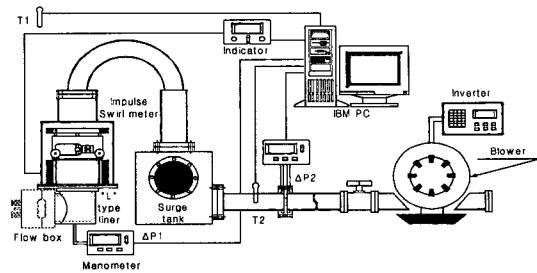


Fig. 3 Schematic diagram of steady state test rig

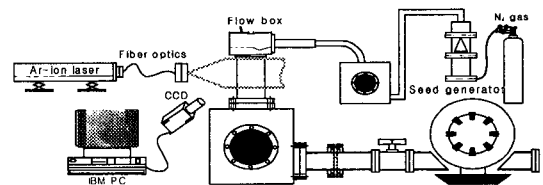


Fig. 4 Schematic diagram of visualization system by using laser sheet

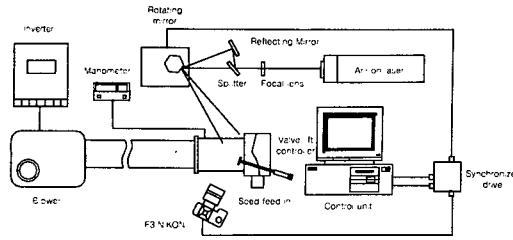


Fig. 5 Schematic diagram of two color PIV experimental setup

2.3 이색 PIV를 이용한 유속 측정 장치

본 실험에서는 밸브 주위와 같이 속도 분포 계측이 어렵고, 유동의 방향판별이 어려운 유동장의 속도 측정을 위하여, 빔 분리기와 회전미러를 이용한 이미지 슈프팅 기법으로 단일화상 이중 노출된 이미지를 취득하여 상호 상관법(cross correlation)으로 속도벡터를 산출할 수 있는 Fig. 5와 같은 이색 PIV 시스템을 구축하여 실험하였다.

먼저 아르곤 레이저로부터 멀티라인 모드로 발진된 레이저빔을 빔 분리기(splitter)에 의하여 청색(488nm)과 녹색(514.8nm) 파장 대역의 빔으로 나누고 회전 미러에 의해 조사 영역을 슈프팅할 수 있도록 구성하였다. 이때 미러의 회전과 동기되어 카메라가 단일 화상에 이중 노출된 영상을 취득하게 된다. 본 연구에서 구성한 이색 PIV시스템의 속도 분해능의 한계를 고려하여 비교적 이미지 취득이 용이한 낮은 차압에서 특이 값을 나타내는 밸브 리프트인 2mm, 5mm에 대하여 밸브 주위의 유속벡터를 측정하였다. 영상을 취득한 밸브 주위의 측정영역은 Fig. 6과 같이 Center 밸브와 Side밸브의 두 영역으로 나누었으며, 각각의 위치는 배기밸브 쪽 펜트루프(pent-roof)로부터 5mm 아래(Front test section)와 흡기 밸브 5mm 아래(Rear test section)로 설정하였다. 측정 영역의 크기는 35mm× 28mm 범위이다.

이 실험 장치를 이용하여 취득된 영상을 필름 스캐너를 통하여 디지털 이미지로 반전(negate)시키면 청, 녹색의 원시화상을 얻게된다. 원시화상에서 x, y좌표상의 픽셀 값을 순서대로 읽어 나가면서 컬러 팔레트 상에서 동일한 픽셀치에 해당하는 R, G, B값을 읽어서 청, 녹색의 기준치와 비교해 가며 컬러 필터링을 수행하였고, 각 검색 영역에 대해 공간 영역의 2차원 계조치 함수를

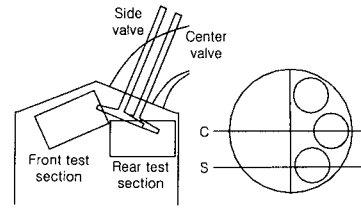


Fig. 6 Schematic diagram of two color PIV test sections

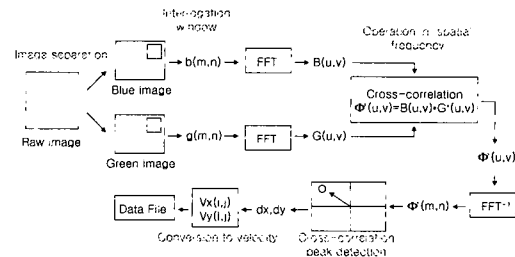


Fig. 7 Algorithm of two color PIV method

읽어 들여 Fig. 7에 나타낸 것처럼 푸리에 변환의 합성 정리(convolution theorem)를 이용하여 상호 상관계수를 계산하였다. 구해진 주파수 영역에서의 상관계수를 역푸리에 변환을 이용하여 공간영역에서 상호 상관계수로 변환시킨후, 상호 상관계수의 최대치 좌표를 검출하는 방식으로 최종 속도 벡터를 구하도록 알고리즘을 작성하였다.

위에서 언급한 알고리즘을 이용한 검증 실험으로 흡기 매니폴드내 유속 벡터를 산출한 예를 Fig. 8에 나타내었다. 도시된 원시화상(Raw image)은 측정된 영상의 검색영역중 하나이며 분할된 검색영역의 원시화상에서 청색과 녹색으로 분리된 두 이미지로부터 Fig. 7의 알고리즘을 통하여 공간영역의 상호 상관계수를 계산하고 그 최대값의 좌표 검출을 통하여 속도벡터를 검출하였다.

PIV로 계측되어진 속도의 범위는 측정장치의 제원에 의해 제한된다. 속도의 범위에 영향을 주는 인자로는 이미지 획득장치의 픽셀 화소수 및 확대비, 빔 주사간격 등이 있으며, Table 1에 본 연구에서 구성한 이색 PIV기술의 속도성분의 측정 범위를 나타내었다. 이 표에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구에서 구축한 PIV시스템을 이용하면 u방향 속도는 20.48m/s, v방향의 속도는 15.36m/s인 범위에서 측정이 가능함을 알 수 있다.

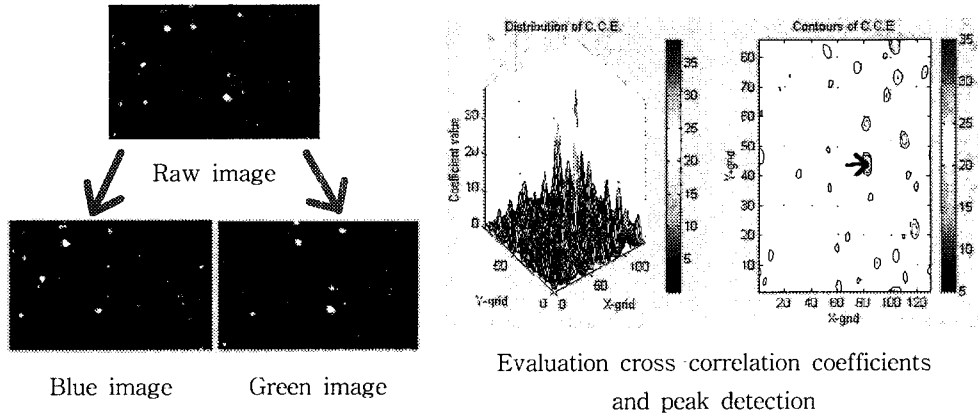


Fig. 8 Calculation of displacement vector by C.C.C. peak detection

Table 1 Dynamic range of velocity components obtained from PIV

	U(m/s)	V(m/s)
Minimum value	0.032	0.032
Maximum value	20.48	15.36
\vec{v}_{min}	0.045	
\vec{v}_{max}	25.60	

3. 실험결과 및 고찰

3.1 정상유동 실험에 의한 텀블비 측정 결과

3.1.1 흡입 유량 특성

밸브리프트와 흡송차압 및 TCV유무에 대한 흡입 유량 측정 결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 두 그림 모두에서 알 수 있듯이 흡기 밸브의 리프트와 흡송 차압이 증가할수록 흡입 공기 유량은 저 밸브 리프트 영역에서부터 증가하는 경향을 보이다가 8mm 이후부터는 그 증가폭이 둔화되는 경향을 확인할 수 있었다. 반면 67%의 개구율을 가진 TCV를 부착함에 따라 전 실험영역에 걸쳐 흡입 유량은 약 10% 감소하는 경향을 나타내고 있다.

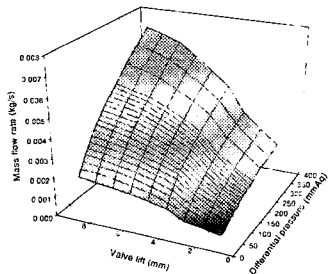


Fig. 9 Mass flow rate w/o TCV

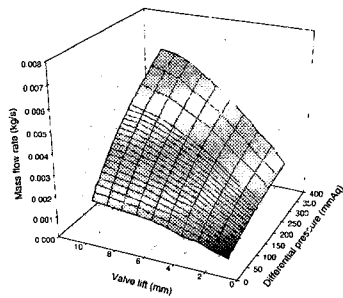


Fig. 10 Mass flow rate with TCV

3.1.2 텀블비(TR) 특성

흡기 3밸브 엔진의 텀블비 특성을 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 결과 그래프에서 알 수 있듯이 텀블비는 밸브리프트 1mm부터 3mm까지는 증가하고, 3mm~5mm까지는 급격한 감소를 보인다. 밸브리프트 5mm 근처에서는 극단적으로 작아지다가 부호가 바뀌는, 즉 역텀블이 발생하는 양상을 볼 수 있다. 6mm이상부터 10mm까지는 텀블비가 다시 증가하는 현상을 확인하였는데, 이러한 흡기 3밸브 엔진 텀블비의 S자 커브는 기존에 알려진 흡기 2밸브 엔진의 텀블비 경향과는 다른 모습을 보여준다. Fig. 12는 개구율 67% TCV를 부착하여 실험한 결과를 나타내고 있다.

TCV가 없는 경우와 비교하여 볼 때 TCV 부착 후 텀블비는 저밸브 리프트 일 때 증가하던 경향은 없어지고 리프트 증가와 함께 급격한 감소를 보이다가 5mm를 전후하여 다시 증가하는 것을 확인하였다. 또한 엔진 흡입 유동에 큰 영향을 미치는 고밸브 리프트 영역에서 텀블 유동이 TCV부착 후 강하게 나타남을 확인하였다.

3.2 실린더 내의 텀블 유동 가시화 결과

Fig. 13은 레이저 시트법을 이용하여 흡기 3밸브 엔진의 흡입 유동을 가시화한 결과이다. 가시화 영역은 실린더내 중심단면의 유동장을 관찰할 수 있는 Center밸브 영역으로서, Fig. 13중의 (e)와 (f)에서 볼 수 있는 것처럼 실린더 중심에 회전 중심을 갖는 큰 스케일의 텀블유동이 측정되었다. 그림 중의 (a)와 (b)결과와 같은 저밸브 리프트에서의 유동은 흡기밸브를 통과해 들어온 공기가 배기 밸브 바로 아래쪽 벽을 타고 흐르다 실린더 라이너와 충돌하여 복잡한 형태의 유동장을 형성하는 양상을 보여준다. 밸브 리프트가 5mm인 (c)와 (d)는 뚜렷한 형태의 큰 스케일의 유동이

형성되지 않는 모습을 나타내고 있으며, 이러한 경향은 정상유동 실험결과 이 리프트 영역에서 텀블비가 매우 낮게 나오는 결과와 잘 일치하고 있다. 가시화 결과에서도 알 수 있는바와 같이 연소실 내에는 고밸브 리프트에서 큰 스케일의 반시계 방향의 와(vortex)가 형성되는 것을 알 수 있었고, Center밸브로부터 형성되는 와의 회전 중심이 Side밸브에서 형성되는 회전 중심 보다 실린더 중심축에 위치하는 것을 가시적으로 확인하였다. TCV를 부착하였을 경우에도, TCV를 부착하지 않은 경우에서 나타난 반시계 방향의 텀블유동 형태가 유지되고 있으나, 텀블비의 저감을 초래한다고 판단되는 흡기 밸브 아래쪽에 형성되는 주 텀블유동과 반대방향의 유동이 고밸브 리프트에서 확연히 감소하였음을 알 수 있었다.

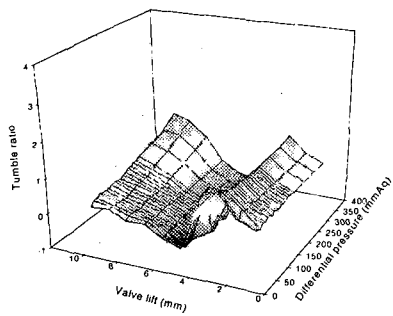


Fig. 11 Tumble ratio w/o TCV

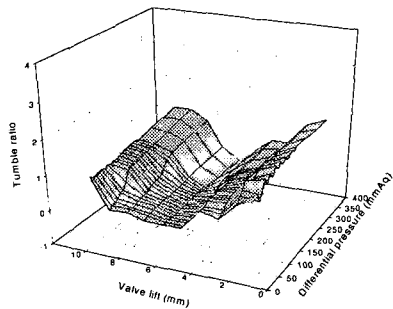
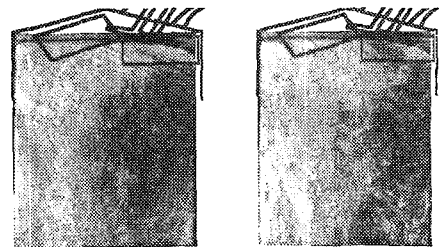
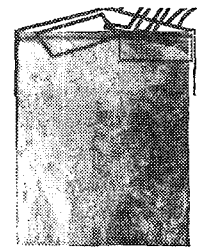


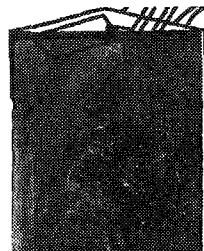
Fig. 12 Tumble ratio with TCV



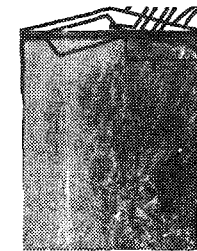
(a) 2mm w/o TCV



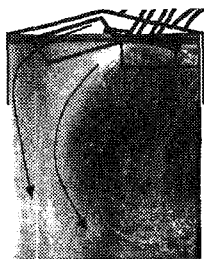
(b) 2mm with TCV



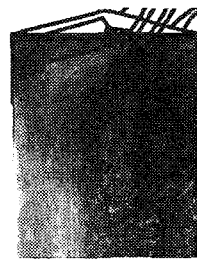
(c) 5mm w/o TCV



(d) 5mm with TCV



(e) 10mm w/o TCV



(f) 10mm with TCV

Fig. 13 Comparison of flow fields for various valve lift and TCV

3.3 흡기 밸브 주위의 유속 분포 특성

Fig. 5의 실험장치를 이용하여 Fig. 6에서 설정한 측정영역에 대한 이색 PIV를 적용한 실험 결과를 Fig. 14~Fig. 19에 나타내었다. Fig. 14~17은 Front 영역에 대한 측정 결과로서 흡기 밸브 쪽에서 배기 밸브 아래 라이너 쪽으로 주유동장이 형성되고 있으며, 작은 스케일의 난동 속도 성분들이 존재하고 있다. 전반적으로 Center 밸브쪽 유동은 Side 밸브를 통과한 유동에 비하여 복잡한 유동 형태를 나타내며 밸브 리프트 증가에 따라 평균유동이 라이너 아래쪽으로 향하는 사실을 알 수 있었다. TCV 부착에 따른 Front 영역의 유동의 변화는 TCV 부착 전보다 단순한 형태의 유동장 형태를 나타내었다. 또한 리프트 변화에 따른 유속 분포를 비교하면 전반적으로 밸브 리프트 5mm일 때가 2mm일 때 보다 유속이 크며 속도구배가 크게 나타났다. Fig. 18, 19는 밸브 리프트 5mm일 때의 Rear 영역에 대한 유동 측정결과로서 왼쪽 위 부분은 흡기밸브의 산란광에 의하여 유속이 측정되지 않은 부분이므로 제거하였다. 계속된 결과를 보면 Front 영역보다는 최고 속도는 낮으나 비슷한 수준의 속도 분포가 계속되었으며 Front 영역에서와 마찬가지로 흡기 밸브에서 라이너가 만나는 부분으로 재순환되는 유동이 관측되었고, 또한 흡기 밸브 밀면 쪽으로의 작은 스케일의 와들이 존재하는 것을 확인하였다. Rear 영역의 TCV 부착 후 측정 결과인 Fig. 18(b)와 Fig. 19(b)에서 TCV가 없을 때보다 흡기밸브를 통과하여 라이너 쪽으로 향하는 강한 속도 분포가 측정되었는데, 이는 실험에 사용한 TCV의 형상에 의하여 텀블유동이 강화되었기 때문으로 판단된다. 이상과 같은 관측 결과로부터 밸브 리프트가 5mm일 때 흡입 유동은 Front 영역뿐만 아니라 Rear 영역에서도 밸브 주위에 고르게 분포하는 사실을 알 수 있었다. 이런 밸브 주위의 고른 흡입 유동은 유량증가 측면에서 유리하지만 연소실내에 강한 평균유동을 만들어 운동에너지를 증가시키는 측면에서는 불리한 영향을 초래한다. 밸브 리프트 5mm일 때의 낮은 텀블비 특성은 유량은 증가하지만 흡기 밸브 아래쪽인 Rear 영역의 유동증가로 인하여 반시계 방향의 텀블 운동이 저감되었기 때문으로 여겨진다.

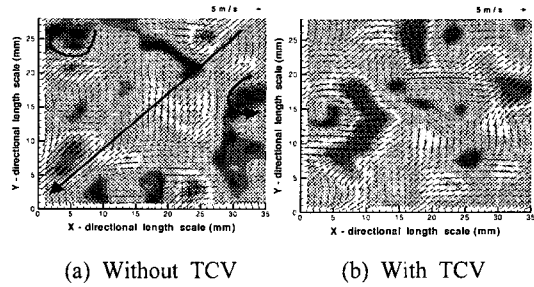


Fig. 14 Front section velocity distributions (2mm, center valve)

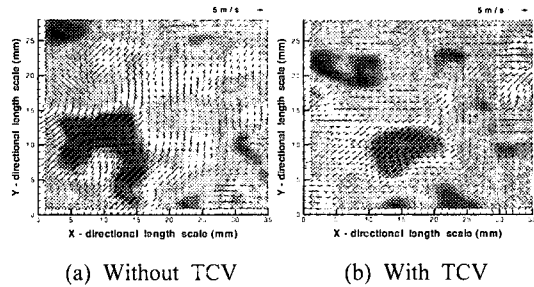


Fig. 15 Front section velocity distributions (2mm, side valve)

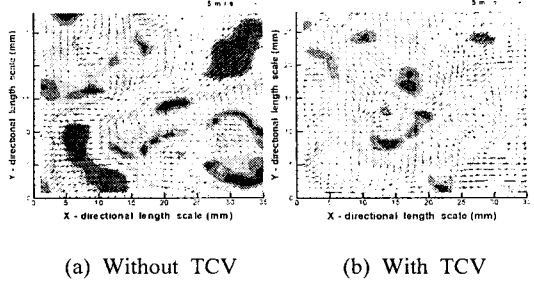


Fig. 16 Front section velocity distributions (5mm, center valve)

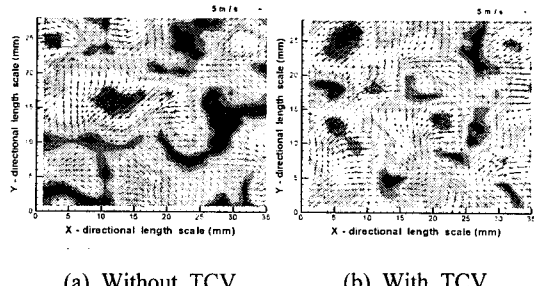


Fig. 17 Front section velocity distributions (5mm, side valve)

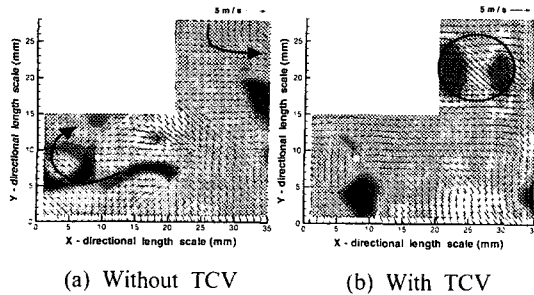


Fig. 18 Rear section velocity distributions (5mm, center valve)

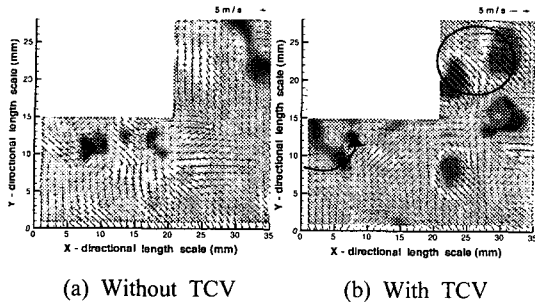


Fig. 19 Rear section velocity distributions (5mm, side valve)

4. 결론

이상과 같은 정상 유동 실험과 가시화 실험들을 통하여 본 연구에서 얻은 결론들은 다음과 같다.

(1) 5밸브(흡기 3밸브)엔진의 텀블비는 기존의 4밸브 엔진과는 상이한 S자 형태를 보이고 있으며, 밸브 리프트가 5mm일 때 급격히 감소하는 경향을 확인하였다.

(2) TCV 부착에 따른 흡입 유량은 10%정도 감소하였고 텀블비는 상대적으로 증가하였다.

(3) 레이저 가시화 결과로부터 Center 밸브의 텀블 유동 중심이 Side 밸브보다 실린더 중심에 위치하는 것을 관측하였다.

(4) 이색 PIV 시스템을 흡기 밸브 주위의 유속

분포에 적용시킨 결과, 밸브 리프트가 증가할수록 흡기 포트와 흡기 밸브 위쪽을 통과하는 유속이 증가하며 그 속도구배 또한 증가한다는 사실을 알 수 있었다. 밸브 리프트가 5mm일 때 흡기 밸브 아래쪽 유동이 증가하여 텀블 형성을 방해하는 사실이 관측되었고 그 경향은 Side 밸브에서 TCV를 부착하였을 때 강하게 나타났다. 이러한 결과들은 정상 유동실험의 S자형 텀블비 경향을 확인시켜주는 결과들이다.

(5) 흡기3밸브 엔진의 TCV부착은 흡기유동 강화에 효과적임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2001년 한양대학교 교내연구비 지원 사업에 의하여 수행되었으며, 관계 기관에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 末松 敏男, 1991, "乗用車用高性能エンジンの開発," 自動車技術, Vol. 45, No. 8, pp. 74~80.
- (2) Kazuo Aoi, Kazuhiko Nomura, and Hiroshi Matsuzaka, 1996, "Optimization of Multi-valve, Four Cycle Engine Design - The Benefit of Five Valve Technology," SAE Paper No. 860032.
- (3) Kuwahara, K., Kawai, T. and Ando, H., 1994, "Influence of Flow field Structure after the distortion of Tumble on Lean-Burn Flame Structure," *International Symposium COMODIA 94*, pp. 89~95.
- (4) Arocumanis, C., Bae, C. S. and Hu, Z., 1994, "Flow and Combustion in a Four-Valve, Spark-Ignition Optical Engine," SAE Paper No. 940475.
- (5) 이기형, 1995, "스윙· 텀블 해석용 각운동량 측정기술의 개발," 생산공학논문집, Vol. 4 No. 1.
- (6) 이영호, 1996, PIV에서의 동시 다점계측의 원리 및 적용, 대한기계학회 '96년도 열 및 유체공학부문 학술강연· 논문집, pp. 30~44.