

# 이색 PIV를 이용한 5밸브 가솔린 엔진의 흡입 유동 해석

우영완\* · 박상찬\*\* · 이기형\*\*\* · 이창식\*\*\*\*

## A Study on Analysis of Intake Flow in a 5-valves Gasoline Engine by using a Two Color PIV System

Youngwan Woo, Sangchan Park, Kihyung Lee and Changsik Lee

**Key Words:** Two color PIV(이색 PIV), Tumble Ratio(팁블비), Tumble control valve(팁블 제어 밸브), Laser sheet(레이저 쉬트), Impulse Tumble Meter(팁블 측정 장치)

### Abstract

A 5-valve(intake 3-valve) engine has been developed to increase engine performance. These vehicles 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, velocity profiles at near intake valves were inspected by using a two-color PIV and laser sheet method with tumble control valve(TCV). In addition, steady flow tests were performed to quantify tumble ratio on flow-fields generated with a TCV. These experimental results show that the tendency of the tumble ratio in intake 3-valve engine is different from the one in intake 2-valve engine. From this results, the intake flow characteristics around intake valves were made clear.

### 1. 서론

최근의 자동차용 가솔린 엔진 개발에 있어서 경량화와 소배기량화로 인하여 저공해 및 저연비의 실현에 유리한 경승용차에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 이러한 경승용차에 대한 가장 큰불만으로 출력의 저하 문제가 지적되고 있으며, 이러한 출력 저하 문제를 개선하기 위하여 흡기 밸브 관성 질량의 저감과 흡기 밸브의 개구 면적의 확대에 의한 유량의 증가 면에서 매우 유리하다고 알려져 있는 5밸브(흡기 3밸브) 엔진에 대한 관심이 고조되고 있다<sup>1)</sup>. 일반적으로 엔진의 출력을 향상시키기 위하여 실린더 보어의 증가에 의한 흡기 밸브의 개구 면적을 증가시키는 것이 효과적인 방법으로 알려져 있지만, 이와

같은 보어의 증가는 연소시 화염 전파 특성을 악화시키고 연소 안전성을 저감시키며 연소실의 전열면적 증가로 냉각 손실의 증가를 초래한다. 이에 반해 흡기 3밸브 엔진은 실린더 보어의 증가 없이 밸브 개수를 늘임으로써 밸브 개구 면적을 증가시킬 뿐만 아니라 연소실의 점화 플러그 및 인젝터 위치의 자유도 또한 증가 시켜 보다 효율적인 출력 증가를 도모 할 수 있는 방법으로 알려져 있다. 또한 최근에는 연소실내에 발생하는 벌크유동(bulk flow)의 제어를 통하여 압축행정 말기 연소실내의 난류강도를 증가시켜 연소 안정화와 효율을 증가시키고자 하는 방법이 연구되고 있다<sup>2)</sup>. 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.

본 연구에서는 연소실내에 생성되는 유동장을 제어하는 방법으로 팁블 제어 밸브(tumble control valve, 이하 TCV)를 사용하여 팁블 유동을 강화한 후, 정상유동 실험을 통하여 팁블비 형태로 정량화 하였으며, 아르곤 레이저를 이용한 가시

\* 한양대학교 대학원

\*\* 한양대학교 대학원

\*\*\* 한양대학교 기계공학과

\*\*\*\* 한양대학교 기계공학과

화 장치를 이용하여 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 보이는 83mm이고, 3개의 흡기 밸브 직경은 26mm로 같으며 좌우 대칭의 포트이 형상이고 연소실은 펜트루프(pent-roof) 형상이다. 이러한 대칭형 실린더 헤드는 스윙유동 보다는 텀블유동 생성에 유리한 소질을 가지고 있는 형상임을 이미 다른 논문에서 밝히고 있으므로<sup>9)</sup> 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 예측면에서 뿐만 아니라 실린더내 유동의 텀블비 측정을 위하여도 필수적이므로, 본 연구에서는 흡입 행정 중의 엔진상태를 모사한 정상유동 실험장치와 정확도 면에서 우수한 오리피스 유량계를 제작하여 일정 차압법으로 실험하였고 실험 장치의 개략도를 Fig.3에 도시하였다. 정상유동 실험을 통하여 텀블을 측정하는 방법에는 여러 가지 방식이 사용되고 있으나, 본 연구에서는 각운동량 측정법을 이용하였다<sup>10)</sup>.

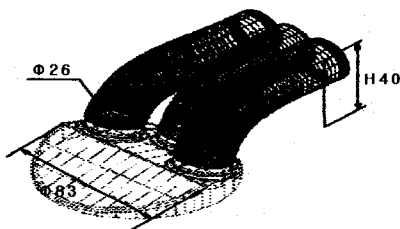


Fig.1 Configuration of intake port and combustion chamber

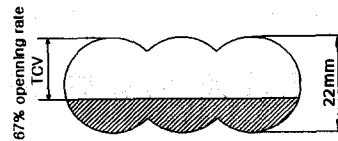


Fig.2 Configuration of a tumble control valve

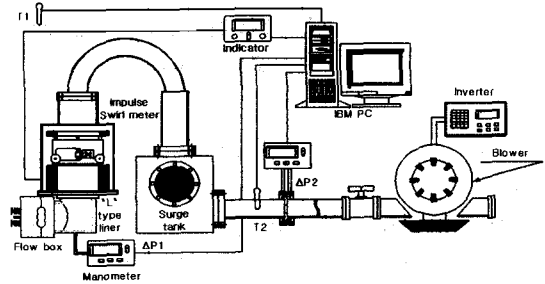


Fig.3 Schematic diagram of steady state test rig

### 2.2 레이저 시트법을 이용한 가시화 장치

정상유동 실험만으로는 흡기 3밸브 엔진의 흡입유동 해석과 흡기 3밸브 헤드의 설계변수를 파악하는 데에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서의 정상유동 실험결과를 레이저 시트법(laser sheet method)을 이용하여 흡기 3밸브 엔진의 흡입 유동장의 가시화 결과와 비교하였다. 실험에 사용된 가시화 실험장치의 주요 구성은 Fig.4에 나타낸 것처럼 광원부로서 수냉식 아르곤 이온 레이저(5W, LEXEL사)를 사용하였으며, 광과이버(OZ OPTICS사), 산란입자 공급장치, 영상취득 장치로서 CCD카메라(Megaplus E1.0 1018×1008, Kodak사)를 사용하였다. 산란입자로는 평균입경 80 $\mu$ m의 micro balloon을 사용하였으며, CCD의 노출시간은 산란입자의 궤적이 잘 나타나도록 1/30 초로 고정하였다.

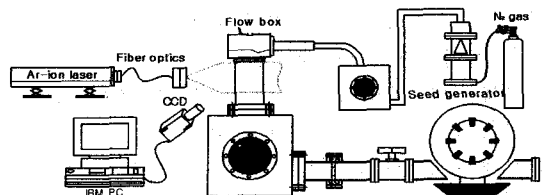


Fig.4 Schematic diagram of visualization system by using laser sheet

### 2.3 이색 PIV를 이용한 유속 측정 장치

본 실험에서는 밸브 주위와 같은 국소 영역에서의 속도 분포 측정이 어렵고, 자기 상관법(auto correlation)에 의한 속도 벡터 산출방법은 유동장 패턴이 복잡한 경우에는 유동의 방향판별이 어려워진다는 단점을 보완하기 위하여, 빔 분리기와 회전미러를 이용한 이미지 쉬프팅 기법으로 단일 화상 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 쉬프팅할 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 특이값을 나타내는 밸브 리프트인 2mm, 5mm에 대하여 밸브 주위의 유속벡터를 측정하였다. 영상을 취득한 밸브 주위의 측정영역은 Fig.6과 같이 Center밸브와 Side밸브의 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.

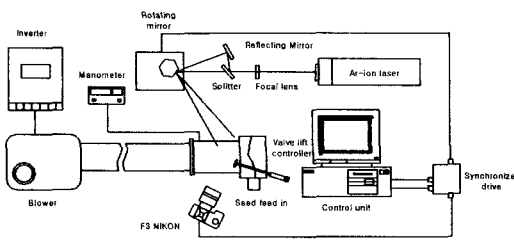


Fig.5 Schematic diagram of two color PIV experimental setup

이 실험 장치를 이용하여 취득된 영상을 필름 스캐너를 통하여 디지털 이미지로 반전(ncgate)시키면 청, 녹색의 원시화상을 얻게된다. 원시화상에서 x, y좌표상의 픽셀 값을 순서대로 읽어 나가면서 컬러 팔레트 상에서 동일한 픽셀치에 해당

하는 R, G, B값을 읽어서 청, 녹색의 기준치와 비교해 가며 컬러 필터링을 수행하였고, 각 검색 영역에 대해 공간 영역의 2차원 계조치 함수를 Fig.7에 나타난 것처럼 푸리에 변환의 합성 정리(convolution)를 이용하여 상호 상관계수를 계산하였다. 구해진 주파수 영역에서의 상관계수를 역 푸리에 변환을 이용하여 공간 영역에서 상호 상관계수로 변환시킨후, 최종 속도 벡터를 구하도록 알고리즘을 작성하였다.

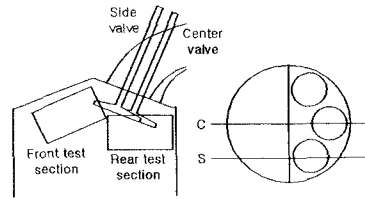


Fig.6 Schematic diagram of two color PIV test sections

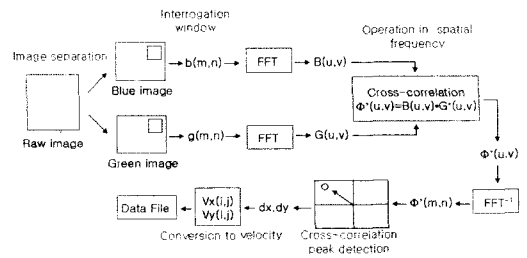


Fig.7 Algorithm of two color PIV method

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 정상유동 실험에 의한 틸블비 측정 결과

#### 3.1.1 흡입 유량 특성

밸브리프트와 흡송차압 및 TCV유무에 대한 흡입 유량 측정 결과를 Fig.8과 Fig.9에 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 확인 할 수 있었다. 67%의 개구율을 가진 TCV를 부착함으로써 전 실험영역에 걸쳐 흡입유량은 약 10% 감소하는 사실을 확인 할 수

있었다.

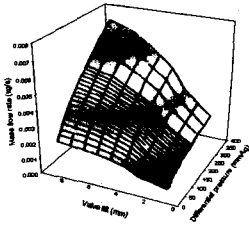


Fig.8 Mass flow rate without TCV

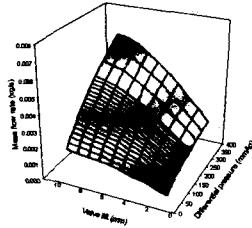


Fig.9 Mass flow rate with TCV

### 3.1.2 텀블비(TR) 특성

흡기 3밸브 엔진의 텀블비 특성을 Fig.10과 Fig.11에 나타내었다. 결과 그래프에서 알 수 있듯이 텀블비는 밸브리프트 1mm부터 3mm까지는 증가하고, 3mm~5mm까지는 급격한 감소를 보인다. 밸브리프트 5mm 근처에서는 극단적으로 작아지다 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.11은 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.

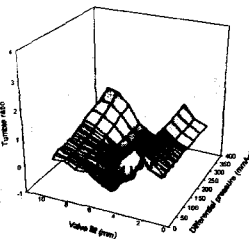


Fig.10 Tumble ratio without TCV

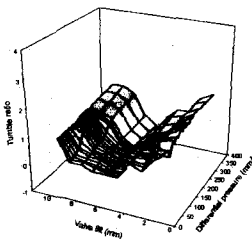
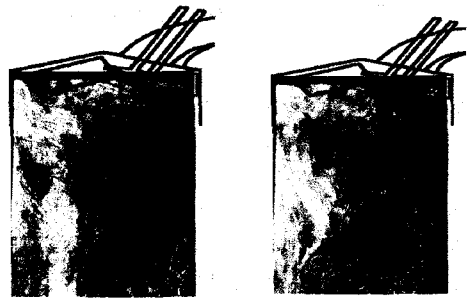


Fig.11 Tumble ratio with TCV

### 3.2 실린더 내의 텀블 유동 가시화 결과

Fig.12는 레이저 시트법(laser sheet method)을 이용하여 흡기 3밸브 엔진의 흡입 유동을 가시화한 결과이다. 가시화 영역은 실린더내 큰 스케일의 벌크(bulk)유동을 관찰 할 수 있는 Center밸브 영역으로서 Fig.12-(e)와 Fig.12-(f)에서 볼 수 있는 것처럼 실린더 중심에 회전 중심을 갖는 큰 스케일의 텀블유동이 측정되었다. 그림 중의 (a)와 (b)에서 보여 주는 것처럼 저밸브 리프트에서의 유동은 흡기밸브를 통과해 들어온 공기가 배기 밸브 바로 아래쪽 벽을 타고 흐르다 실린더 라이너와 충돌하여 복잡한 형태의 유동장을 형성하는 양상을 보여준다. 이러한 작은 스케일의 유동은 압축행정 중 일찍 소멸되어 버린다. 밸브 리프트가 5mm인 (c)와 (d)는 정상유동 실험결과에서 예상되었던 것처럼 뚜렷한 형태의 큰 스케일의 유동이 형성되지 않는 것을 확인 할 수 있었다. 가시화 결과에서도 확인 할 수 있듯이 엔진의 흡입 행정 동안에 생성되는 유동에 큰 영향을 미치는 고밸브 리프트에서 큰 스케일의 반시계방향의 와(vortex)가 형성되는 것을 알 수 있었고, Center밸브로부터 형성되는 와의 회전 중심이 Side밸브에서 형성되는 회전 중심 보다 실린더 중심측에 위치 하는 것을 가시적으로 확인하였다. Fig.12-(b),(d),(e)에서 관찰 할 수 있듯이 TCV를 부착하였을 경우, TCV를 부착하지 않은 경우에서 나타난 반 시계방향의 텀블유동 형태를 유지하는 것을 알 수 있었고 또한 흡기 밸브 아래쪽 유량이 고밸브 리프트에서 확연히 감소하였음을 알 수 있었다. 이러한 흡기 밸브 아래쪽의 유동은 주텀블 유동과 반대방향으로 텀블비의 저감을 초래한다.



(a) 2mm w/o TCV

(b) 2mm with TCV

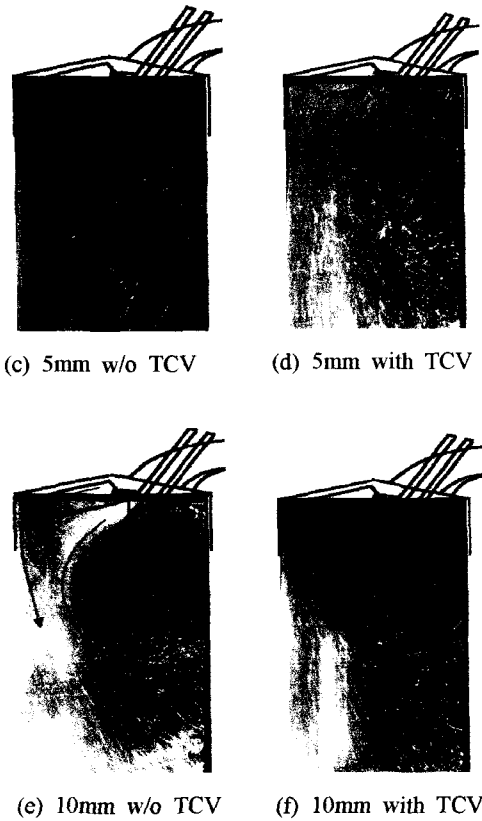


Fig.12 Comparison of flow fields for various valve lift and TCV

### 3.3 흡기 밸브 주위의 유속 분포 특성

Fig.5와 같은 실험장치를 이용하여 Fig.6의 Front영역과 Rear영역에 대한 이색 PIV 실험 결과를 Fig.13~ Fig.18에 나타내었다. 흡기 포트와 흡기 밸브 위쪽을 통해서 유입되는 유동이 텀블 유동을 일으키는 주 유동이 된다는 사실을 알 수 있다. Fig.13~Fig.16는 모두 Front영역의 측정 결과로서 흡기 밸브 쪽에서 배기 밸브 아래 라이너 쪽으로 형성되는 벌크 유동이 확인되었고 흡기 포트와 흡기 밸브로부터 생성된 작은 스케일의 난동속도들이 계측되었다. 또한 배기 밸브 아래 쪽에 유동의 재순환 영역이 관찰되었으며, 흡기 밸브 밑면쪽으로도 재순환되는 작은 스케일의 와류들이 존재함을 알 수 있었다. Fig.13와 Fig.14는 밸브 리프트가 2mm 인 경우로서 가시화 결과에서도 확인 할 수 있듯이 작은 속도의 복잡한

유동들이 계측되었다. Center밸브쪽 유동은 Side밸브를 통과해 유입되는 유동과 혼합되어 Side밸브를 통과한 유동에 비하여 라이너 아래쪽으로 향하는 사실을 알 수 있었으며 Side밸브쪽 유동 속도의 구배가 역시 크게 나타났다. TCV 부착에 따른 Front영역의 유동의 변화는 거의 관찰되지 않았다. Fig.15~Fig.18은 정상유동 실험에서 가장 낮은 텀블비를 나타낸 밸브 리프트 5mm일때의 유속 분포를 나타낸 것이다. Rear영역에서 역시 흡기 밸브에서 라이너가 만나는 부분으로 재순환되는 유동이 관측되었으며 또한 Front 영역에서와 마찬가지로 흡기 밸브 밑면 쪽으로의 작은 스케일의 와들이 존재하였다. Rear영역의 TCV 부착후 결과인 Fig.17과 Fig.18을 보면 TCV가 없을 때보다 흡기밸브를 통과하여 라이너 쪽으로 향하는 속도분포가 강하게 형성되는게 특징을 보이고 있다. 특히 Side밸브 결과인 Fig.17-(b)와 Fig.18-(b)에서 이와 같은 결과가 뚜렷히 나타났다. 이상의 관측 결과를 분석하여 볼 때 밸브 리프트가 5mm 일 때 흡입 유동이 Front 영역뿐만 아니라 Rear영역 등과같은 밸브 주위에 고르게 분포하는 사실을 알 수 있었다. 이런 밸브 주위의 고른 유동은 흡입 유량 측면에서 유리하나 연소실내 유동의 운동에너지 증가 측면에서는 분리한 영향을 초래할 것으로 추측된다.

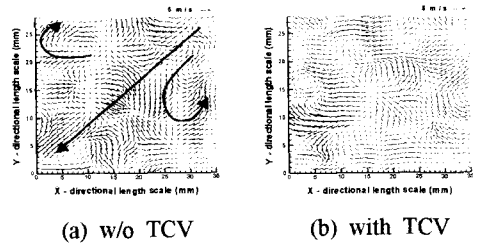


Fig.13 Front section velocity distributions (2mm, center valve)

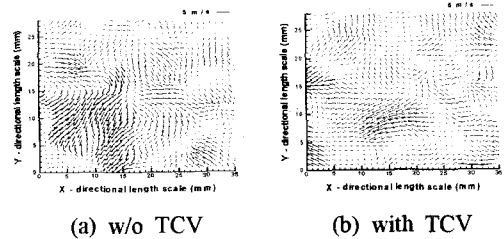


Fig.14 Front section velocity distributions (2mm, sider valve)

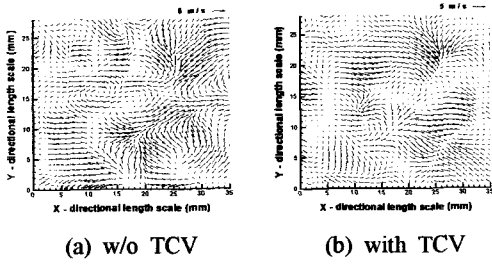


Fig.15 Front section velocity distributions (5mm, center valve)

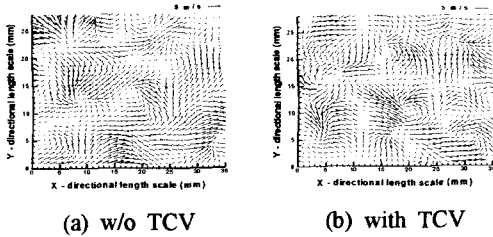


Fig.16 Front section velocity distributions (5mm, sider valve)

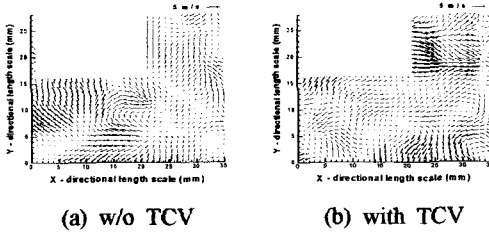


Fig.17 Rear section velocity distributions (5mm, center valve)

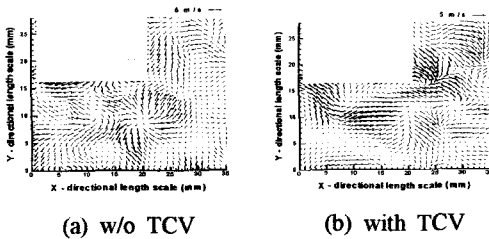


Fig.18 Rear section velocity distributions (5mm, sider valve)

#### 4. 결론

이상과 같은 정상유동 실험과 가시화 실험들을 통하여 본 연구에서 얻은 결론들은 다음과 같

다.

- 1) 5밸브(흡기 3밸브)엔진의 텀블비는 기존의 4 밸브 엔진과는 상이한 S자 형태를 보이고 있으며, 밸브 리프트가 5mm일 때 급격한 감소를 보이는 것을 확인하였다.
- 2) TCV 부착에 따른 흡입 유량은 10%정도 감소하였고 텀블비는 상대적으로 증가하였다.
- 3) 레이저 가시화 결과 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 흡기포트와 흡기 밸브 위쪽을 통과하는 유동이 증가하며 그 속도구배가 증가한다는 사실을 알 수 있었다. 밸브 리프트가 5mm 일 때 흡기 밸브 아래쪽 유동이 증가하여 텀블 형성을 방해하는 사실이 관측되었고 그 경향은 Side 밸브에서 TCV를 부착하였을 때 강하게 나타났다.

#### 참고문헌

- (1) Kazuo Aoi, Kazuhiko Nomura, and Hiroshi Matsuzaka, "Optimization of Multi-valve, Four Cycle Engine Design - The Benefit of Five Valve Technology", SAE Paper No.860032, 1996
- (2) K. Kuwahara, T. Kawai and H. Ando, "Influence of Flow field Structure after the distortion of Tumble on Lean-Burn Flame Structure", International Symposium COMODIA 94, pp.89-95
- (3) C. Arocumanis, C. S. Bae and Z. Hu, "Flow and Combustion in a Four-Valve, Spark-Ignition Optical Engine", SAE Paper No.940475, 1994
- (4) 이기형, "스윙·텀블 해석용 각운동량 측정기술의 개발", 생산공학논문집, Vol.4 No.1, 1995