

## 흡입 밸브 각도에 따른 압축 행정 중 실린더 내 유동 특성

엄인용\* · 박찬준

서울산업대학교 기계공학과

## In-Cylinder Compression Flow Characteristics According to Inlet Valve Angle

Inyong Ohm\* · Chanjun Park

Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea  
(Received 28 November 2005 / Accepted 17 January 2006)

**Abstract** : A PIV (Particle Image Velocimetry) was applied to measure in-cylinder velocity field according to inlet valve angle during compression stroke. Two engines, one is conventional DOHC 4 valve and the other is narrow valve angle, were used to compare real compression flow. The results show that the flow patterns are well arranged compared with intake flow and the basic tumble flow structures are maintained until end compression stage regardless of valve angle. Also the results show that the tumble motion is intensified by momentum conservation during compression in normal engine. In the normal engine, the bulk shape of flow pattern is “Y” type at the top of cylinder and reverse “Y” type at the bottom of cylinder and weak reverse flow exists at the top of cylinder along cylinder center line. Otherwise, the other engine's flow pattern changes from “Y” type to “T” type at the top of cylinder during compression.

**Key words** : PIV(Particle Image Velocimetry, 입자영상유속계), Valve angle (밸브 각), In-cylinder flow(실린더 내부유동), Tumble(텀블)

### 1. 서론

기관의 실린더 내 유동은 밸브 각, 포트 각을 포함한 거시적인 흡기계의 구성과 포트의 형상에 지배를 받는데, 이 중 밸브 각은 유동의 기초 특성을 좌우하는 매우 중요한 인자이다. 따라서 본 연구의 이전 논문<sup>1)</sup>에서는 통상적인 밸브 각을 갖는 상용 엔진과 협각의 밸브 각도를 갖는 엔진을 대상으로 입자영상유속계(PIV, particle image velocimetry)를 이용해 양자의 실린더 내 흡입 유동 특성을 측정하여 비교하였고 두 엔진의 수평면 유동 특성과 수직면의 텀블 유동 특성이 상이함을 관찰하였다. 흡입 유동의 특성도 파악해야 할 중요한 내용이지만 실제로 연소 과정에 참여하는 유동은 압축 말기의 유동이

므로 압축 과정 중 유동 특성 특히 말기의 유동 파악이 실린더 내 유동 파악의 가장 핵심적 내용으로 볼 수 있다.<sup>2-5)</sup>

현재까지 입자영상유속계(PIV, particle image velocimetry) 등을 이용한 실린더 내 유동 해석은 정상 유동,<sup>6,7)</sup> 국부적 유동 특성 파악,<sup>8)</sup> 또는 한 단면의 측정 결과만 제시하여 유동에 대한 3차원적 정보 획득이 어려운 것이 대부분이다.<sup>9,12)</sup> 또한 600-800 RPM 정도의 저속으로 운전하여 실물 엔진의 운전 상태와 거리가 멀다.<sup>9,11)</sup>

따라서 본 연구에서는 앞서 파악한 흡입 유동 특성에 기초하여 압축 과정에서 밸브 각에 따른 실린더 내 유동 특성에 대한 기초 데이터를 제공하고자 한다.

\*Corresponding author, E-mail: iyohm@snut.ac.kr

## 2. 실험 장치

유동 측정에 사용된 PIV 장치 구성은 Fig. 1에 나타내었다. 실험엔진에서 관측이 불가능한 실린더 내부를 용이하게 관측할 수 있게 가시화 변환기(visualization conversion kit : 일차 피스톤, 연장 투명 피스톤, 연장 투명 실린더로 구성)를 엔진에 적용하였다.

시험에 사용된 엔진의 제원과 포트 특성을 Table 1에 나타내었다. Eng. 1은 통상의 상용 엔진을 단기통으로 제작한 것이며 Eng. 2는 Eng. 1과 동일한 형상을 가졌으나 밸브 각만 달리한다. 표의 와류 및 틸블 값은 정상 유동 장치에서 충격식 와류 측정기(Impulse swirl meter)를 사용하여 측정된 결과이다.

Fig. 2에 비교 대상인 엔진의 개략도와 밸브 각의 정의를 나타내었는데 밸브 각은 실린더 종방향 축과 밸브가 이루는 각도로 정의된다.

엔진의 운전 속도는 1800 RPM, 흡기관의 압력은 50 kPa로 설정하였는데 이는 대표적인 부분부하 운

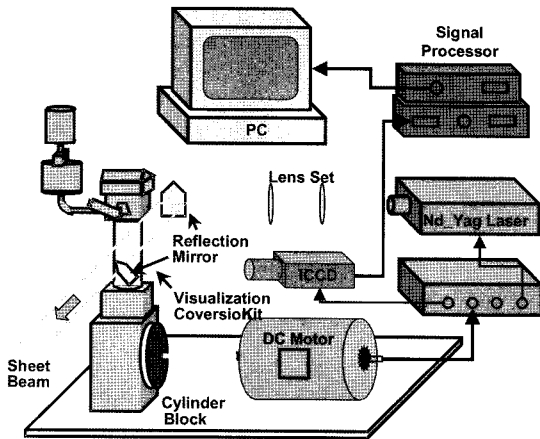


Fig. 1 Schematics of PIV measurement system

Table 1 Specification of engine

		Eng. 1	Eng. 2
No. of Valve(In./Ex.)		2/2	←
Intake Valve Angle		25°	6°
Valve Timing		5/35, 43/5	←
Combustion Chamber		Semi Wedge	←
Bore(mm)/Stroke(mm)		75.5/83.5	←
Steady Flow	Swirl	-0.1	0.1
	Tumble	1,2	-1.3

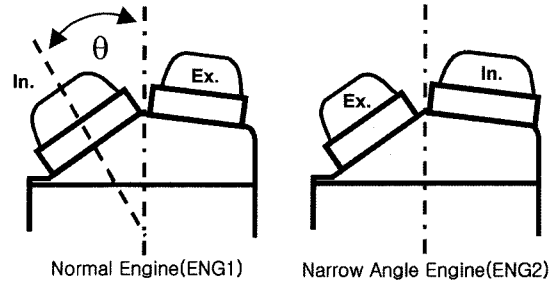


Fig. 2 Definition of valve angle and layout of engine

Table 2 Measurement position and timing

	Horizontal	Vertical
측정 단면	TDC - 7 mm TDC - 19 mm TDC - 41 mm TDC - 77 mm	Rear Valve Center Cylinder Center Front Valve Center
측정 시기	240, 270, 300, 320 (Intake ATDC)	←

전 조건을 상사한 것이다. 측정 위치와 시기는 Table 2에 나타내었고 수평 측정 단면의 위치는 각각 30, 50, 80, 140° CA일 때 피스톤 상면의 위치이고 수직 측정 면은 각각 실린더 중심, 전측 밸브 중심, 후측 밸브 중심을 따른 면이다. 장치의 구체적 설명 및 기타 내용에 대한 자세한 설명은 본 논문의 이전 논문<sup>1)</sup>에 기재되어 있으므로 생략하였다.

Fig. 3에 각 측정 단면의 위치와 그림에 사용될 기본적인 좌표계를 나타내었는데, 밸브 각의 변경에 따라 흡입 밸브의 위치가 서로 반대 방향이지만 이를 그림에 나타낼 때는 비교를 위하여 수평면의 경우 항상 흡입 밸브의 위치가 그림의 하면에 위치하도록 하였다. 또한 수직 측정 단면에 대한 흡입 밸브 위치도 서로 반대 방향에 있게 되는데 이 위치는 그림에서 변경하지 않고 사용하였다. 실린더 수평면

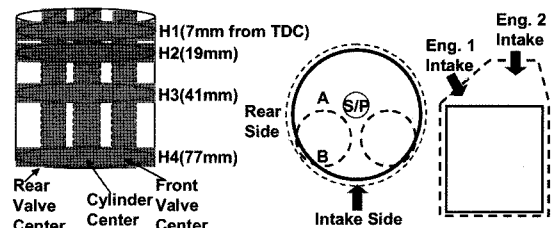


Fig. 3 Measurement plane and basic coordination system

과 수직면을 나타낸 그림에서 점선은 실제 엔진의 경계이고 실선은 관측 가능한 면을 나타낸다. 수평 단면 속도를 제시한 그림에서 점선으로 나타낸 원은 실제 엔진의 보어(75.5mm)이고 실선은 측정이 가능한 범위(직경 65.5mm)를 나타낸다.

### 3. 결과 및 해석

#### 3.1 압축 중 유동

Fig. 4에 흡입 밸브가 닫힌 후 25° CA가 경과한 압축 초기의 속도 분포를 제시하였다.

Eng. 1의 경우 실린더 상면(H1, H2 평면) 유동은 실린더의 외각에서는 대체로 흡기에서 배기 쪽으로 흐르고 반면 중심부에서는 배기 측에서 실린더의 중앙으로 향하는 유동이 관찰된다. 이러한 외각 및 중앙으로 향하는 유동에 의해 평면 전체에 규모는 크지만 강도는 약한 두개의 와류가 존재한다. H3 평면은 텀블 유동의 중심 근처에 위치하고 있다. 따라서 이 부근에 지배적 유동이 존재하지 않기 때문에 상당히 불규칙한 유동 특성을 보여 주는데 특징적인 것은 엔진의 후측에서 전측을 가로 지르는 유동 성분이 관찰된다는 것이다.

이 시기의 평면 유동의 특징은 대체로 중심보다 외각 유동이 강하고 수직면 유동은 규모는 크지만 강도는 약한 텀블 형태를 지니고 있다. 그리고 흡입 행정 중에는 텀블의 중심이 유동 측정면의 상부에 위치한 반면 압축이 진행되면서 이 중심이 거의 유동 측정면의 중앙으로 이동해 있음을 알 수 있다.

Eng. 2의 경우 H1 평면에서 유동은 일관되게 계속 배기 측으로 흐르고 있는데 이는 수직면 유동 측정에서 관찰되는 바와 같이 텀블의 상부 유동이 관찰된 결과이다. H2와 H3 평면에서는 흡기 쪽에서 실린더의 중심 방향으로 다시 중심을 지나 배기 쪽으로 진행하면서 실린더 외곽으로 진행하는 강한 유동이 관찰된다. 뒤에 후측 밸브 면 유동에서 자세히 논의하겠지만 이는 흡입 유동 시 발생하였던 실린더 상부의 흡입 밸브 하면의 2개의 텀블이 실린더 하면에서 생성된 큰 규모의 텀블에 흡수되어 전체 실린더에 걸친 큰 텀블 유동을 형성하였기 때문에 나타난 것으로 판단된다. 특히 H3보다 H2에서 넓은 범위에서 강하게 중심을 흐르는 유동이 관찰되고

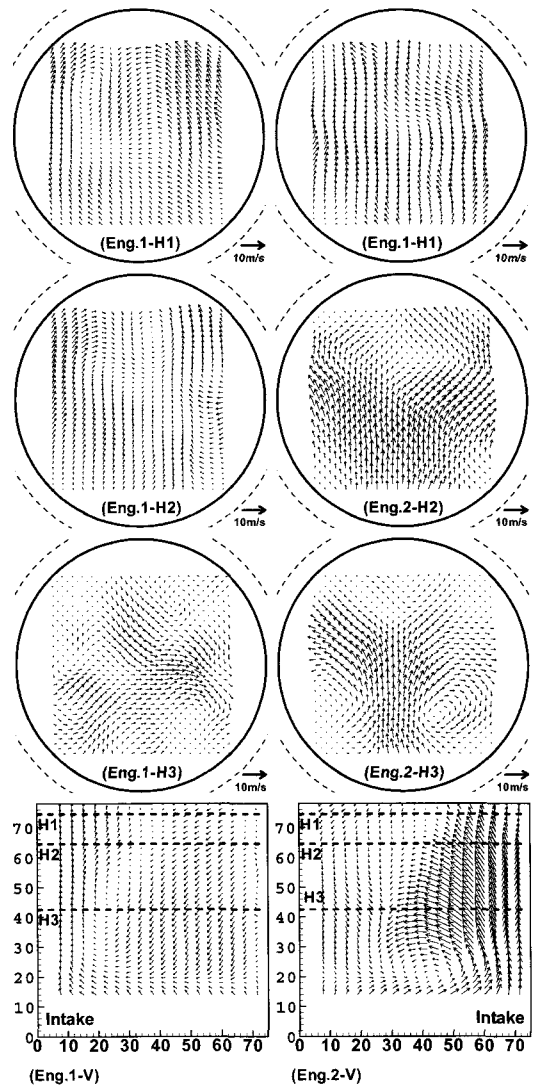


Fig. 4 Velocity field at early compression stage(ATDC 240° CA), (H1) : 7mm, (H2) : 19mm, (H3) : 41mm from TDC

이 유동이 H3 평면에서는 중심으로 모였다가 외각으로 진행하는 반면 H2 평면에서는 흡기 쪽에서는 전체적으로 배기 쪽으로 흐르다가 실린더의 중심에서 서서히 갈라지는 형태를 보여준다. 이후 미루어 볼 때 실린더의 상부에 있는 즉 텀블의 중심보다 위에 있는 유동은 전체적으로 “Y” 자 형태를 지닌다고 판단된다. 수직면 유동은 강하고 큰 스케일의 텀블 유동 형태를 지니고 있다. 그러나 배기 측의 하강하는 수직 유동 성분은 흡기 행정 중에는 상당한 속도

를 유지하였지만 압축이 진행되면서 급격히 속도가 줄어들고 있음을 볼 수 있고 반면 흡기 쪽 유동은 여전히 상당한 속도를 지니고 있음이 관찰된다.

Fig. 5에 압축이 상당히 진행된 ATDC 270° CA 즉 점화 BTDC 90° CA에서 측정된 결과를 도시하였다.

먼저 Eng. 1의 상면(H1)에서는 압축 초기의 유동과 유사하게 실린더의 외각을 따라 흡기에서 배기 쪽으로 흐르다 다시 중심 면을 따라 배기에서 흡기 쪽으로 유동이 형성된다. H2 평면에서는 흡기에서 배기 쪽으로의 유동이 H1 평면보다 강하게 나타나고 역시 배기 쪽에서는 실린더의 중심 방향으로 흐르는 유동이 관찰된다. 수직면 유동을 참고하면 H1과 H2는 큰 규모의 텀블 유동의 상부 성분임을 알

수 있다.

텀블 유동 중심의 아래에 있는 H3 평면에서는 상당히 큰 속도 성분이 관찰된다. 이를 수직면 유동 측정 결과와 함께 관찰해 보면 압축이 진행되면서 텀블이 강해짐을 알 수 있다. 이는 Eng. 1의 흡입 밸브 각도가 실린더의 종축에 대해 26° 기울어져 있으므로 흡입 유동이 실린더에 유입할 때 상당량의 텀블 성분 각 속도를 지니고 있고, 보울 인(bowl-in)형 디젤 연소실에서 압축 진행에 따라 와류가 강해지는 것과 같은 메커니즘으로 압축 진행에 따라 텀블 각 속도 성분이 운동량 보존에 의해 강화되어 나타난 결과로 사료된다.

Eng. 2의 경우 수평면 유동의 특징은 실린더 상부(H1 평면)에서는 실린더의 중심 부분의 유동이 상당히 강화되는데 이는 수직면 유동에서 관찰되는 텀블 유동의 상부가 관찰된 결과이다. H2 평면의 유동은 압축 초기 H3 평면의 유동(Fig. 4 Eng. 2-H3)과 매우 유사한데, 두 평면은 절대적 위치의 차이는 있으나 텀블 중심 상부의 비교적 강한 유동이 일어나는 곳으로서 텀블에 대한 상대적 위치는 비슷하다. 이로 미루어 볼 때 압축 진행에 따라 텀블 유동의 규모는 작아지지만 그 상부의 기본 구조는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 실린더 하면(H3 평면) 즉 텀블 중심의 아래의 유동도 대체로 텀블 유동 방향을 잘 나타내고 있다. 특이한 것은 실린더의 중심선 보다 밸브 중심선 유동이 강하게 나타나는데 이는 밸브 상면을 통해 진입한 주유동이 아직 강하게 남아 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한 이 평면의 유동 패턴과 압축 초기 텀블 중심 위의 단면 H2 평면(Fig. 4 Eng. 2-H2)의 패턴이 방향만 반대일 뿐 매우 유사한 형태를 지니고 있다. 이로 미루어 보아 협각 엔진의 텀블 구조는 대체로 중심에 대해 대칭적인 구조를 가지고 있다고 판단된다.

Eng. 2의 수직면 유동은 Eng. 1이 각운동량의 보존 등으로 압축 중 텀블이 강화되는 양상을 보인 반면 Eng. 2에서는 배기 측의 텀블 성분이 많이 사라진 것으로 관측된다. 즉 실린더를 양분하여 좌측(배기 쪽)에는 유동이 거의 없고 우측에는 강한 유동이 존재함을 볼 수 있다. 이는 압축 중 소산이나 마찰 등으로 속도가 줄어든 것이라기보다는 밸브 상단을

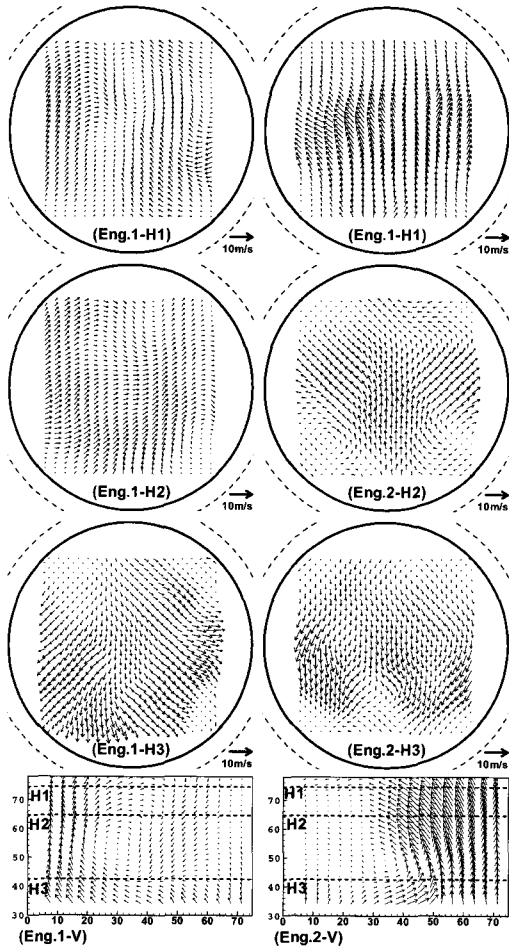


Fig. 5 Velocity field during compression stage(ATDC 270° CA), (H1) : 7mm , (H2) : 19mm, (H3) : 41 from TDC

통과한 강한 주유동이 이미 피스톤의 하면을 지나 흡기 쪽으로 대부분 이동하였기 때문에 발생한 결과로 판단된다.

### 3.2 압축 말기

Fig. 6에 압축 말기에 해당하는 ATDC 300° CA (점화 BTDC 60° CA)의 유동 측정 결과를 도시하였다.

먼저 Eng. 1의 경우 다른 시기에 비해 비교적 유동이 전체적으로 잘 정돈되어 있음이 관찰된다. 특히 H1 평면 유동은 ATDC 270° CA의 H2 평면 유동과 매우 유사하며 H2 평면 유동도 텀블 방향으로 일정하게 흐르는 것이 ATDC 270° CA의 H3 평면 유동과 유사한 것으로 보아, 이것도 역시 압축 진행에 따라 절대적 위치는 차이가 나지만, 텀블 중심에 대한 상대적 위치는 두 평면이 동일하기 때문에 발생한 것으로 판단되며 따라서 Eng. 1도 압축 중에는 기본 텀블 구조가 잘 유지된다고 판단된다. 수직면 유동의 경우 텀블의 중심 위치는 대체로 유동 면적의 중심에 위치함을 알 수 있다.

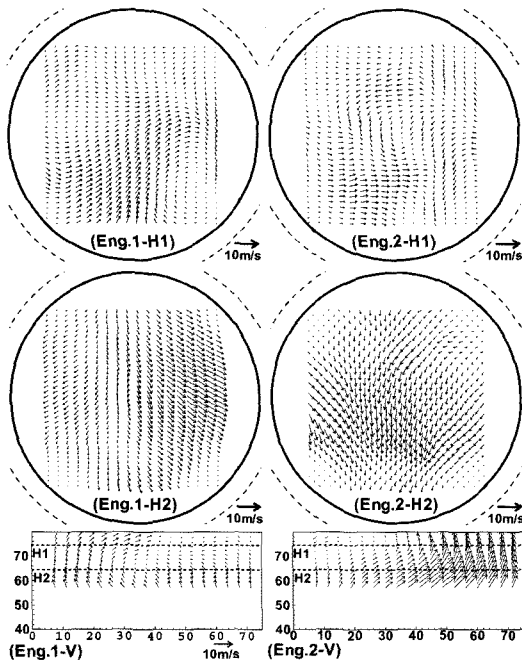


Fig. 6 Velocity field at end compression stage(ATDC 300° CA), (H1) : 7mm , (H2) : 19mm from TDC

Eng. 2의 경우 H1 평면 유동은 다른 시기와 달리 매우 복잡한 형태를 지니고 있다. 이는 이 평면이 거의 텀블 유동의 중심 면에 위치하기 때문에 지배적 유동의 부재로 나타난 결과로 사료된다. 대체로 유동은 반시계 방향의 큰 규모의 와류 형태를 지니고 있다. H2 평면에서 유동은 크게 배기 측의 외곽에서 흡기 쪽 중심으로 이동하는 형태를 보여 주는데 이 유동도 텀블 유동의 아래 성분이 측정된 것임을 고려하면 압축 진행에 따라 밸브 중심선을 따라 더 강하게 형성됐던 텀블 성분이 실린더 중심선 방향으로 이동하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 압축 말기 ATDC 320° CA(점화 BTDC 40° CA)에서의 측정 결과이다.

이 시기에 수평 측정 면은 두 엔진 모두 텀블의 중심 아래에 있고 이전 시기인 ATDC 300° CA의 H2 평면 유동과 기본적으로 같은 양상을 보여 준다. 다만 차이가 나타나는 것은 Eng 2의 경우 밸브 중심선을 따라 형성됐던 텀블 성분이 실린더 중심선 방향으로 이동하는 것이 더욱 뚜렷이 나타나고 있다. 이로 미루어 보아 두 엔진 모두 압축 중에는 유동 면적의 축소에 따라 텀블의 크기는 변화하지만 그 전체적 구조는 유지된다고 판단된다. 수직면에서 측정된 속도 성분으로 유추해 볼 때 Eng 1의 경우 텀블의 중심이 배기 쪽으로 더 진행한 것으로 판단되고 Eng 2는 대체로 ATDC 300° CA와 동일한 위치를 점하고 있는 것으로 판단된다.

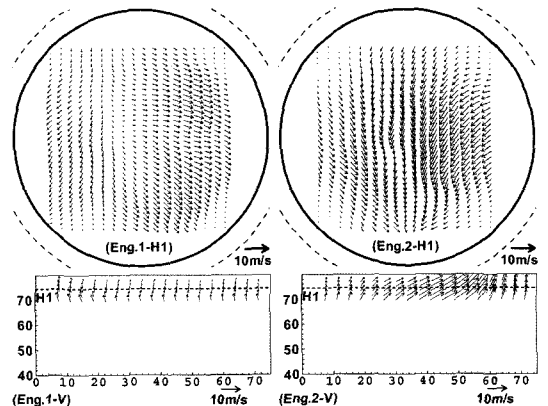


Fig. 7 Velocity field at end compression Stage(ATDC 300° CA), (H1) : 7mm from TDC

### 3.3 압축 과정 중 전체 거동

전체적으로 실린더 중심 수직면에서 텀블의 중심 위치와 형태는 Eng. 1의 경우 흡입 및 압축 초기에는 실린더 상부의 흡기 쪽에 길게 사선으로 형성되다가 압축 진행에 따라 텀블의 중심이 실린더의 중심으로 그리고 다시 배기 쪽으로 “U” 자형으로 이동하며 형태도 긴 사선에서 원형에 가까워진다. 반면 Eng. 2는 흡입 및 압축 초기에는 흡기 쪽 실린더의 아래쪽에 중심이 위치하고 그 형태도 원형을 유지하다가 압축의 진행에 따라 중심의 형태가 좌우로 긴 모양으로 변하고 위치도 실린더의 종축 중심으로 “L” 자형으로 이동한다.

Fig. 8에 흡입 행정 중 후측 밸브 중심 면을 따라 측정할 수직면 유동 측정의 결과를 나타내었다. 전측 밸브 중심 면 유동은 이 결과와 대동소이하여 제시하지 않는다.

그림에서 볼 수 있듯이 밸브 중심선 단면의 유동은 실린더 중심 단면과 비교할 때 상당한 차이점을 보여주고 있다. Eng. 1의 경우 압축 초기에 밸브 중심선 단면에서는 유동은 실린더 중심 단면의 유동과 유사하게 큰 규모의 텀블 유동을 형성하나 텀블의 중심은 중심 단면 유동보다 실린더의 아래에 존재하고 텀블 중심도 원형에 가깝게 나타나며 압축 진행에 따라 중심의 이동 경로와 형태의 변화도 Eng. 2의 실린더 중심선을 따른 수직 유동과 유사하다. 이는 밸브 중심면의 경우 실린더 종 방향 유동이 더 빠르고 깊숙하게 실린더로 진입한 결과로 사료되며 종 방향 속도가 더 빠른 협각 엔진에서 관찰된 결과와도 잘 일치한다.

Fig. 9에 이들 측정 결과를 종합하여 유동 특성을 도시하였다. 먼저 통상적인 2 흡기 밸브 엔진의 압축 유동은 밸브 중심선 단면의 텀블 유동이 더 강하고 중심도 실린더의 아래에 존재하며 흡기 쪽을 따라 상향 운동을 한 후 다시 실린더 상부에서 “Y” 형으로 좌우로 갈라져 배기 쪽으로 실린더 벽면을 따라 진행한 후 다시 이 두 유동이 모아서 실린더 중심선을 따라 흡기 쪽으로 이동한다.

협각 엔진인 Eng. 2의 경우는 전체적으로는 Eng. 1과 유사한 형태이지만 밸브 중심선 단면의 텀블 중

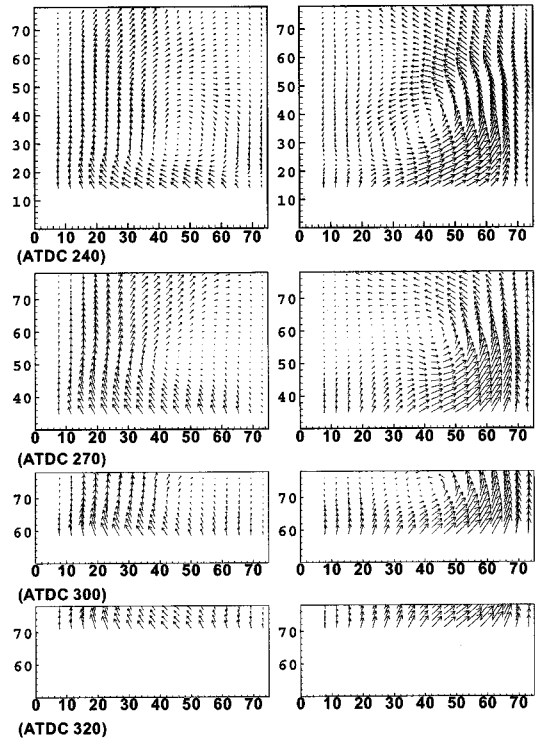


Fig. 8 Velocity field of rear valve center plane

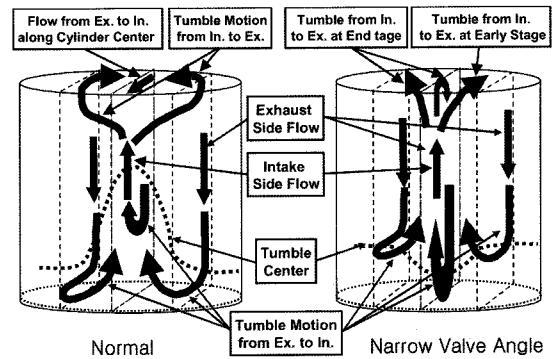


Fig. 9 Tumble pattern of engine during compression stroke

심이 Eng. 1과 달리 실린더 중심선 단면의 텀블보다 위에 존재하고 실린더 상부의 유동도 Eng. 1과 같이 “Y” 형으로 갈라지나 배기에서 흡기로 다시 오는 유동이 없고 압축의 진행에 따라 상부 유동은 “T” 형을 이루고 하부의 유동도 밸브 중심선 단면보다 실린더 중심선 단면의 유동이 더 강하게 나타난다.

#### 4. 결론

PIV를 이용하여 통상적인 엔진과 협각 엔진의 압축 유동 특성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 압축 행정 시 유동은 흡입 행정에 비해 잘 정돈된 형태로 나타나며 밸브 각에 관계없이 압축 시 텀블의 기본 구조는 변화하지 않고 잘 보존이 된다.
- 2) 통상 엔진의 경우 압축 행정 중 텀블 유동은 운동량 보존에 의해 강화된다.
- 3) 협각 엔진의 경우 텀블 구조는 대체로 상하 대칭적인 특징을 갖는다.
- 4) 통상적인 엔진은 전체적 텀블 유동 형태가 상부는 “Y” 형이고 하부는 역 “Y” 형이며 특히 상부 유동에서는 실린더 중심을 따른 역류가 발생한다.
- 5) 협각 엔진은 압축 초기 상부 유동은 “Y” 형이고 압축 진행에 따라 “T” 형으로 변화한다. 하부 유동은 압축 초기 밸브 중심선 단면 유동이 강하나 말기에는 실린더 중심선 단면 유동이 더 강해진다.

#### References

- 1) I. Y. Ohm and C. J. Park, “In-Cylinder Intake Flow Characteristics according to Inlet Valve Angle,” Transactions of KSAE, Vol.14, No.3, pp.142-149, 2006.
- 2) I. Y. Ohm and Y. S. Cho, “Mechanism of Axial Stratification and its Effect in an SI Engine,” SAE 2000-01-2843, 2000 SAE Transaction - Journal of Fuel & Lubricants, 2001.
- 3) I. Y. Ohm and Y. S. Cho, “In-Cylinder Fuel Behavior according to Fuel Injection Timing and Port Characteristics in an SI Engine : Part I-Without Swirl,” Transactions of KSAE, Vol.9, No.2, pp.19-27, 2001.
- 4) I. Y. Ohm and Y. S. 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. pp. 3, 9-17, 2001.
- 5) I. Y. Ohm and Y. S. Cho, “In-Cylinder Fuel Behavior according to Fuel Injection Timing and Port Characteristics in an SI Engine : Part III-With High Swirl,” Transactions of KSAE, Vol.9, No.3, pp.18-26, 2001.
- 6) G. B. Cho, C. H. Jeon, Y. J. Chang and K. Y. Kang, “Characteristics of In-cylinder Steady Flow using PIV for Different Intake Port Geometries in a 4-valve Gasoline Engine,” Transactions of KSAE, Vol.5, No.5, pp.188-196, 1997.
- 7) S. Y. Lee, K. S. Jeong, C. H. Jeon and Y. J. Chang, “Study on The In-Cylinder Flow Characteristics of An SI Engine Using PIV,” Int. J. Automotive Technology, Vol.6, No.5, pp.453-460, 2005.
- 8) K. H. Lee, C. S. Lee, H. G. Lee, M. S. Chon and Y. C. Joo, “Spatial Analysis of Turbulent Flow in Combustion Chamber using High Resolution Dual Color PIV,” Transactions of KSAE, Vol.6, No.6, pp.132-141, 1998.
- 9) C. H. Lee, K. H. Lee and C. S. Lee, “An Experimental Study on the Flow Characteristics and the Stratification Effects in Visualization Engine Using the DPIV and the Entropy Analysis,” Transactions of KSAE, Vol.13, No.1, pp.9-18, 2005.
- 10) K. H. Lee, J. D. Ryu, C. S. Lee and R. D. Reitz, “Effect of Intake Port Geometry on The In-Cylinder Flow Characteristics in A High Speed D.I. Diesel Engine,” Int. J. Automotive Technology, Vol.6, No.1, pp.1-8, 2005.
- 11) J. H. Park, N. H. Lee and K. H. Choi, “Analysis of In-Cylinder Flow Fields using Particle Image Velocimetry,” Transactions of KSAE, Vol.7, No.4, pp.46-53, 1999.
- 12) J. H. Park, N. H. Lee and K. H. Choi, “Analysis of Spray and Flow Fields for Development of Spark-ignited Direct Injection Engine,” Transactions of KSAE, Vol.6, No.6, pp.202-209, 1998.