

흡입 밸브 각도에 따른 실린더 내 흡입 유동 특성 비교

엄인용* · 박찬준

서울산업대학교 기계공학과

In-Cylinder Intake Flow Characteristics according to Inlet Valve Angle

Inyong Ohm* · Chanjun Park

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea
(Received 24 October 2005 / Accepted 2 January 2006)

Abstract : A PIV (Particle Image Velocimetry) was applied to measure in-cylinder velocity field according to inlet valve angle during intake stroke. Two engines, one is conventional DOHC 4 valve and the other is narrow valve angle, were used to compare real intake flow. The results show that the intake flow pattern of conventional engine is more complicated than that of narrow angle one in horizontal plane and the vertical component of in-cylinder flow is rapidly decayed at the end stage of intake. On the other hand, the flow pattern of narrow angle one is relatively well arranged in horizontal plane and the vertical velocity component remains so strongly that forms large-scale strong tumble. Two engines also form commonly three tumble; two are small and bellow the intake valve and one is large-scale. The center of large scale tumble moves to bottom of cylinder as the vertical velocity increases.

Key words : PIV(Particle Image Velocimetry, 입자영상유속계), Valve angle(밸브 각), In-cylinder flow(실린더 내 부유동), Tumble(턴블)

1. 서론

내연 기관의 실린더 내 유동은 기본적으로 밸브 각, 포트 각을 포함한 거시적인 흡기계의 구성과 포트의 형상에 지배를 받는다. 이러한 흡기계 구성에 따라 기관 내부의 유동 특성은 달라지며, 난류 강도와 같은 미시적 유동 특성은 주로 연소 속도에 관계하고, 와류를 포함한 거시적 유동 특성은 실린더 내 혼합기 분포를 좌우하여 결과적으로 연소 성능에 영향을 주므로, 궁극적으로 흡기계 구성은 기관의 성능에 지대한 영향을 미치는 요소이다. 특히 분사 시기와 와류의 조합에 의한 축상 성층화 엔진에서는 실린더 내 유동이 성층화의 상태와 강도를 지배하는 주요한 인자이다.¹⁻⁴⁾

이들 흡기계의 구성 요소 중에서도 흡입 밸브의 각도는 실린더 내 유동을 지배하는 가장 중요한 변수이다. 또한 포트 형상, 포트 각도 등과 같은 설계 인자들은 개발 과정 중 설계 변경이 비교적 자유로운 반면 개념설계에 해당하는 밸브 각은 한번 설계가 종료되면 개발 과정 중에 변경이 거의 불가능하다. 이와 같이 기관의 성능 개발 목표에 부합되는 흡입 밸브 각도의 선정은 매우 중요한 문제이지만 현재까지 입자영상유속계(PIV, particle image velocimetry) 등을 이용한 실린더 내 유동 해석은 정상 유동,^{5,6)} 국부적 유동 특성 파악,⁷⁾ 또는 한 단면의 측정 결과만 제시하여 유동에 대한 3차원적 정보 획득이 어려운 것이 대부분이다.⁸⁻¹²⁾ 또한 600-800 RPM 정도의 저속으로 운전하여 실물 엔진의 운전상태와 거리가 멀다.^{8,10,11)} 또한 상기의 흡기계 설계인자에

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

대한 변경 없이 한 가지 경우에 대한 데이터를 제시하였기 때문에 비교를 통한 특성의 파악이 용이하지 않고 따라서 설계인자 변화에 따른 효과의 파악에 어려움이 따른다.

이에 본 논문에서는 통상적인 밸브 각을 갖는 상용 엔진과 협각의 밸브 각도를 갖는 엔진을 대상으로 PIV를 이용해 양자의 실린더 내 흡입 유동 특성을 측정하여 밸브 각도에 따른 실린더 유동 특성에 대한 기초 데이터를 제공하고자 한다.

2. 실험 장치

2.1 PIV 시스템

유동 측정에 사용된 PIV 장치 구성은 Fig. 1에 나타내었다. 실물엔진에서 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. 이렇게 구성된 가시화 엔진의 연장 투명 피스톤 아래에 반사경을 45°의 각도로 장착시켜 실린더 수평면을 관측할 수 있게 하였다.

유속 측정에 사용된 입자는 SMD 30 μ m Lycopodium이며 사용된 레이저는 Double cavity Nd-Yag (200W, 532nm, Spectra-Physics)로 두 개의 평면 광을 시간차를 두고 측정 부위에 조사한다. 조사된 레이저에 의한 산란광은 CCD 카메라(Kodak, Megaplus ES1.1, Kx1K)로 촬영되어 PIV 처리기(Dantec, PIV 2000)로 보내져 상호 상관법(cross-correlation)으로

속도를 계산한다.(32 \times 32 pixel interrogation area, 25% overlap, and 5 \times 5 averaging area)

2.2 대상 엔진

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.

Fig. 2에 비교 대상인 엔진의 개략도와 밸브 각의 정의를 나타내었는데 밸브 각은 실린더 종방향 축과 밸브가 이루는 각도로 정의되고 따라서 밸브 각이 6°인 Eng. 2는 흡입 밸브가 직립에 가깝게 장착되었음을 의미한다.

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

Fig. 3에 각 측정 단면의 위치와 그림에 사용될 기본적인 좌표계를 나타내었다. 그림에 표시된 바와 같이 밸브 각의 변경에 따라 흡입 밸브의 위치가 서

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

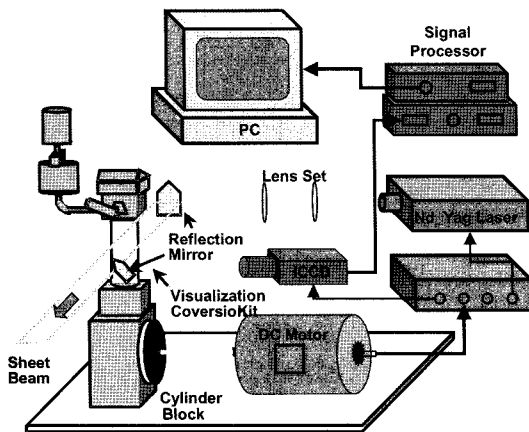


Fig. 1 Schematics of PIV measurement system

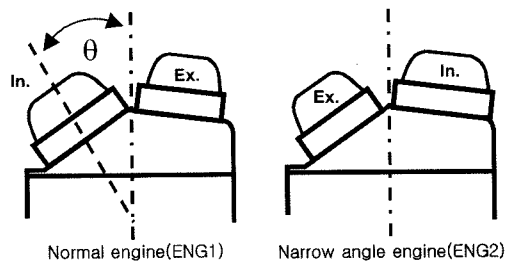


Fig. 2 Definition of valve angle and layout of engine

Table 2 Measurement plane and timing

	Horizontal	Vertical
Measuring plane (mm From TDC)	7, 19, 41, 77	Rear valve center Cylinder center Front valve center
Measuring timing	60, 120, 180, 210 (Intake ATDC)	←

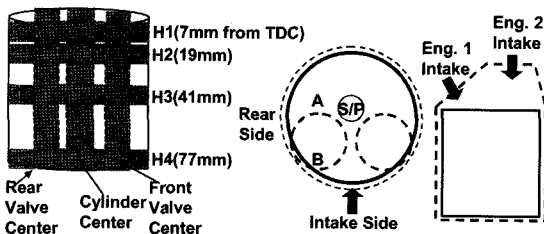


Fig. 3 Measurement plane and basic coordination system

로 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 수평면과 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

Fig. 4~8에 흡입 행정 중 각 엔진의 시험 조건에 따른 속도 분포 데이터를 제시하였다. 수직 단면 속도 그림에서 점선으로 나타낸 H1, H2는 수평 측정 단면의 위치를 나타낸다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이 두 흡기 시스템은 초기 거동부터 상당한 차이를 보여주고 있다. Eng. 1의 경우 실린더 상단의 수평면 유동(H1 평면)은 주 유동 방향인 배기 쪽의 유동과 다시 흡기 쪽으로 역류하는 유동이 모두 관찰된다. 특히 이 역류는 실린더 중심보다 흡입 밸브가 있는 좌우에서 뚜렷이 나타나는데 이에 대해서는 뒤의 밸브면 수직 유동에서 자세히 논의하겠다.

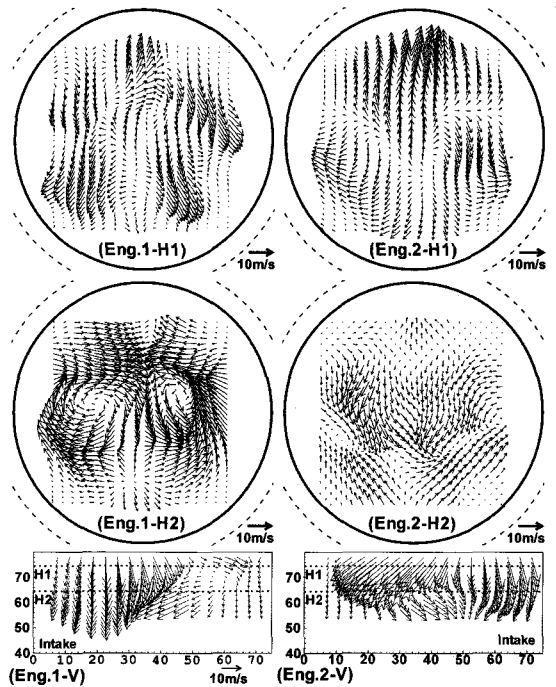


Fig. 4 Velocity field at early intake stage(ATDC 60° CA), (H1) : 7mm , (H2) : 19mm from TDC

조금 아래의 H2 평면에서는 서로 방향이 반대인 두개의 큰 규모의 와류 유동이 형성되는데 이는 두 흡입 밸브의 유동 중 실린더 벽 쪽으로 유입된 유동이 벽의 간섭을 받아 다시 실린더 중심으로 돌아오면서 발생한 것으로 판단된다. 수직면 유동은 밸브의 하단을 통과한 유동(Fig. 3의 B 방향)이 더 빠르게 진행하고 있고 밸브의 상단을 통과한 유동(Fig. 3의 A 방향)은 크게 발달되지 않음을 볼 수 있다. 원래 밸브 주변의 유동 중 B방향은 실린더 벽 등에 의한 간섭으로 A방향의 유동보다는 약하다고 알려져 있는데 이 시기에 상단을 통과한 강한 유동은 아직 실린더 상부의 헤드 연소실 부분을 통과하지 못하여 관측 면에서 다소 약하게 관찰된 것으로 판단된다.

Eng. 2는 이와 매우 다른 모습을 보여 주고 있다. 우선 수평면 유동의 경우 실린더 상단(H1)에서 배기 밸브 쪽을 향하는 유동이 강하게 형성되고 있고 H2 평면에서도 두개의 와류가 형성됨을 볼 수 있지만 Eng. 1에 비해 강도가 약하고 위치도 실린더의 벽 쪽에 존재하는데 이는 밸브 각이 협각이므로 흡입 유동 중 실린더 벽을 향하는 수평 성분이 상대적으로

로 작기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 다시 흡기 쪽을 향하는 역류는 Eng. 1과 달리 H1 평면과 H2 평면에서 모두 관찰되는데 특히 H2 평면에서는 실린더 중심 면에서도 뚜렷이 관찰된다. 수직면 유동의 경우 Eng. 1에서 밸브 상면을 통과하여 배기 쪽을 향하는 유동이 이 시기에 잘 관찰이 되지 않는 반면 Eng. 2의 경우 이 유동이 벌써 실린더까지 깊숙이 빠르게 진행해 왔음을 알 수 있다.

Fig. 5는 흡입 행정 중(ATDC 120° CA)의 속도 측정 결과이다. Eng. 1의 경우 H1 평면의 유동은 실린더 전 방향으로 고루 발달되어 있고 특히 흡입 초기와 비교하여 배기 밸브 측으로의 유동이 강하게 나타난다. 이는 수직면에서 측정된 결과에도 나타나 있듯이 밸브의 상단(A방향)을 통과한 주유동이 헤드의 연소실을 벗어나 실린더에 도달하였기 때문이다. H2 평면에서는 흡입 초기와 같이 밸브 아래 부분에서 흡기 쪽으로 되돌아오는 역류가 관찰되는데 실린더 중심의 유동은 배기 쪽을 향하고 있다. H3 평면에서 두개의 와류를 형성하는데 이는 흡입 초기에 나타났던 와류와 비교해 강도도 약해지고 와류의 중심도 실린더의 외각으로 치우쳐 있다. 그리고 전 평면에 걸친 역류가 발생하는데 이는 수직 단면의 유동에서 보여지듯 A방향으로 유입된 주유동이 밸브 하면을 통해 들어온 유동보다 강하여 실린더 하부에서 큰 규모의 텀블을 형성하기 때문이다.

Eng. 2의 경우 실린더 상면(H1)의 유동은 확실히 배기 밸브를 향하는 유동이 강하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 양상은 H2 평면까지 지속되는데 Eng. 1의 경우 유동이 실린더의 외각을 향하는 반면 Eng. 2의 경우 외각의 유동이 중심으로 들어오고 이어 중심에서 배기 밸브 측으로 이동하는 형태를 나타낸다. H3 평면에서 유동의 방향은 다시 흡기 밸브 쪽을 향하게 되는데 이는 수직 평면 유동 결과에서 관찰되었듯이 큰 규모의 텀블 유동이 발생하였기 때문이다. 수직면 유동의 특징은 Eng. 1보다 텀블이 더 큰 규모로 뚜렷이 발생되고 텀블 유동의 중심이 대체로 실린더의 중앙에 위치한다는 것이다.

전체적으로 협각 엔진인 Eng. 2는 Eng. 1에 비해 수직 방향의 속도 성분이 매우 크고 또한 동일한 시간에 실린더 종 방향으로 빠르고 깊숙이 유동이 진

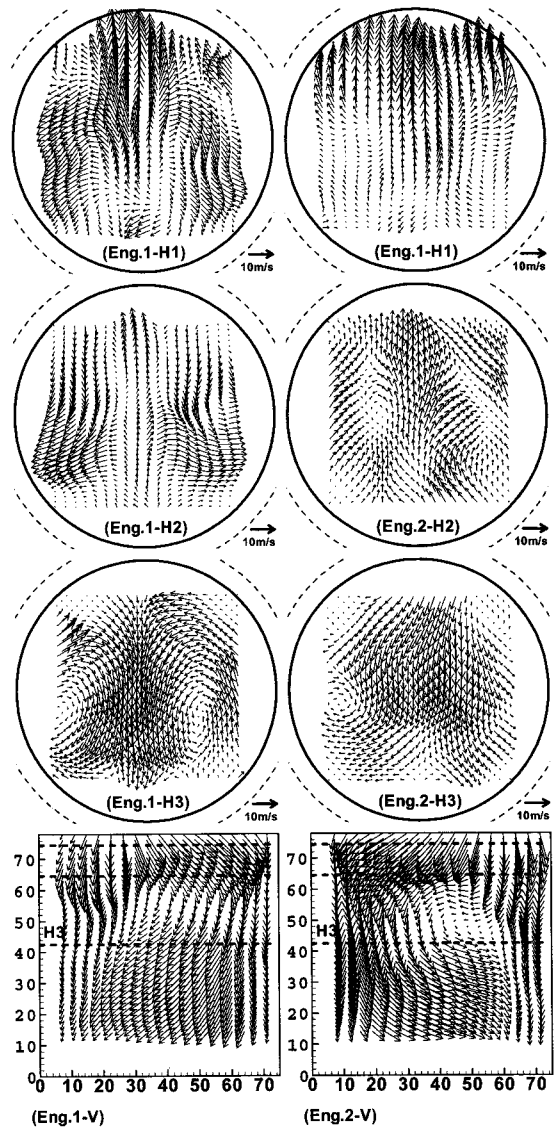


Fig. 5 Velocity field during intake stroke(ATDC 120° CA), (H1) : 7mm, (H2) : 19mm, (H3) : 41 mm from TDC

행함을 관찰할 수 있다.

Fig. 6은 피스톤이 하사점에 도달하였을 때의 속도 분포를 측정된 결과이다. 대체로 이 시기의 유동은 수평면 속도 성분이 앞서의 경우와 달리 크지 않고 아울러 비교적 잘 정돈된 모습을 보여준다. Eng. 1의 경우 H1, H2, H3 평면에서 좌우에 소규모의 와류가 2개씩 존재하는데 그 위치는 평면마다 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 반면 실린더의 하면에서 갑자기 수평면의 속도가 증가된 경향을 나타내는데

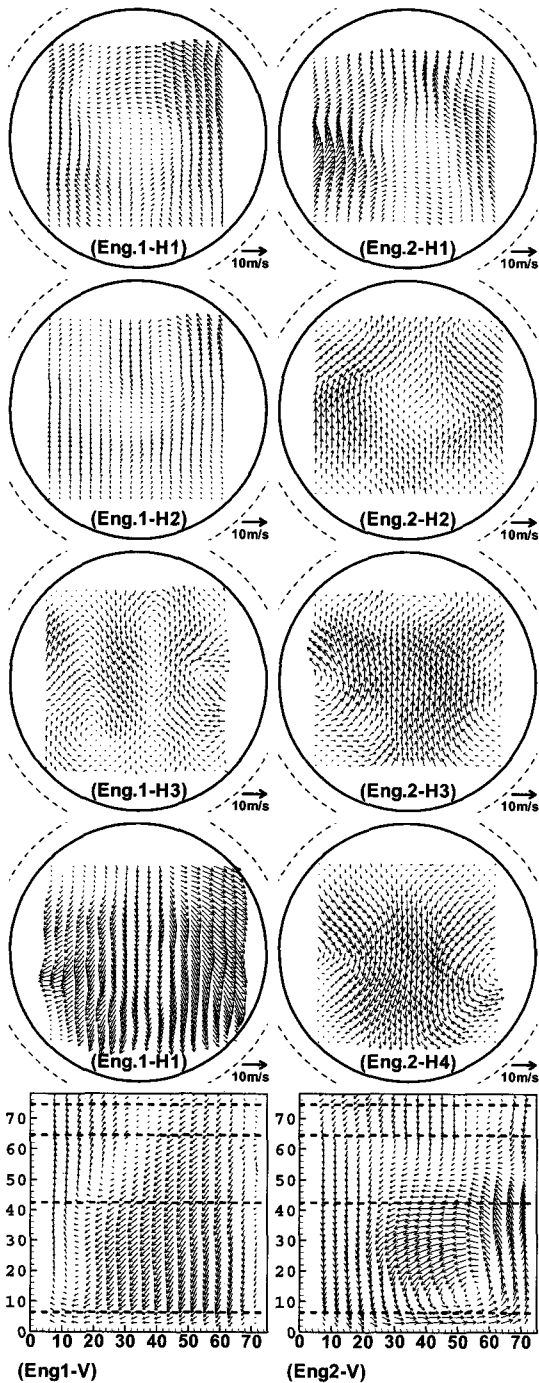


Fig. 6 Velocity field at BDC(ATDC 180° CA), (H1) : 7mm, (H2) : 19mm, (H3) : 41 (H4) : 77 mm from TDC

이는 유동이 피스톤에 충돌하면서 수직 방향의 속도를 잃고 텀블 유동으로 변화하기 때문인 것으로

판단된다. 이 시기에 수직면의 유동은 완벽한 텀블 유동의 형태를 보여주고 있고 텀블의 중심은 실린더의 상부에 존재한다.

Eng. 2의 수평면 유동은 대체로 Eng. 1과 달리 소규모 와류의 생성 등은 관찰되지 않고 주로 한 방향으로만 진행하고 있음을 알 수 있다. 이는 수직면 유동에서 나타나듯 이 엔진의 흡기 유동은 수직 방향이 주성분이므로 텀블 유동이 전체 실린더에 걸쳐 강하게 나타나기 때문이다. 텀블 유동에 의해 실린더 하면의 유동 방향이 상부와 반대가 되고 있음이 관찰된다.(H4 평면) 또한 Eng. 1과 달리 텀블의 중심이 실린더의 하면에 존재하고 있으며 이를 ATDC 120° CA에서의 유동과 비교해 보면 흡입이 진행함에 따라 텀블의 중심이 아래로 이동하고 있음을 볼 수 있다. 이도 이 엔진의 흡기 유동의 실린더 수직 방향 속도가 크데 기인한다고 판단된다.

Fig. 7은 흡입 밸브가 닫히는 시점 부근인 ATDC 210° CA의 측정결과로 이 때 피스톤은 하사점을 지나 다시 상승하나 흡입 밸브는 열려있어 포트로의 역류가 발생할 수 있는 경우이기도 하다. 이 시기의 유동은 BDC에서의 유동과 비교하여 거시적으로 유사함을 알 수 있다. 차이점은 Eng. 1의 경우 대체로 유속이 감소하였고 H1, H2 평면에 존재하였던 작은 와류들이 소멸되었고 반면 실린더의 중간 부분에 해당하는 H3 평면에서는 여전히 소규모의 와류 유동이 관찰된다는 것이다 그리고 수직면 유동에서 텀블 유동의 형태는 유지하고 있으나 그 강도가 현저히 약해진 것을 알 수 있다. Eng. 2의 경우는 수평면 유동이 오히려 강화되어 나타남을 볼 수 있는데 이는 큰 규모의 텀블 유동이 존재하므로 그 유동의 수평 성분이 측정된 결과로 사료된다. 또한 텀블의 중심도 상대적으로 피스톤 상부에 더 접근하고 있으며 텀블의 중심에서 먼 곳의 속도는 줄었지만 중심에 가까운 곳에서는 오히려 속도가 증가되었음이 관찰된다. 이는 압축 과정 중 각운동량 보존에 의해 중심에 가까운 부근에서는 종방향의 텀블 유동이 강화되고 벽면 등에서 가까운 곳의 유동은 마찰, 난류 소산 등에 의해 속도가 줄어든 결과로 사료된다.

Fig. 8에 흡입 행정 중 실린더의 중심 단면이 아닌 후측 밸브 중심면을 따라 측정된 수직면 유동 측정

흡입 밸브 각도에 따른 실린더 내 흡입 유동 특성 비교

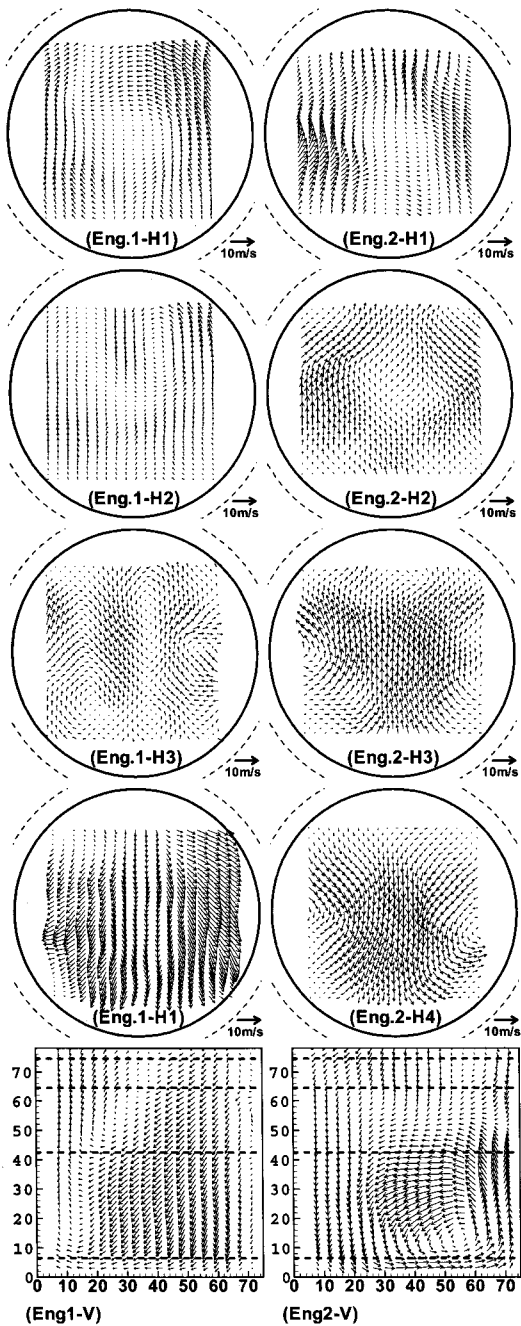


Fig. 7 Velocity field at intake valve closing (ATDC 210° CA), (H1) : 7mm, (H2) : 19mm, (H3) : 41 mm, (H4) : 77mm from TDC

의 결과를 나타내었다. 전측 밸브 중심면 유동은 이 결과와 대동소이하여 제시하지 않는다.

그림에서 볼 수 있듯이 밸브 중심 단면의 유동은

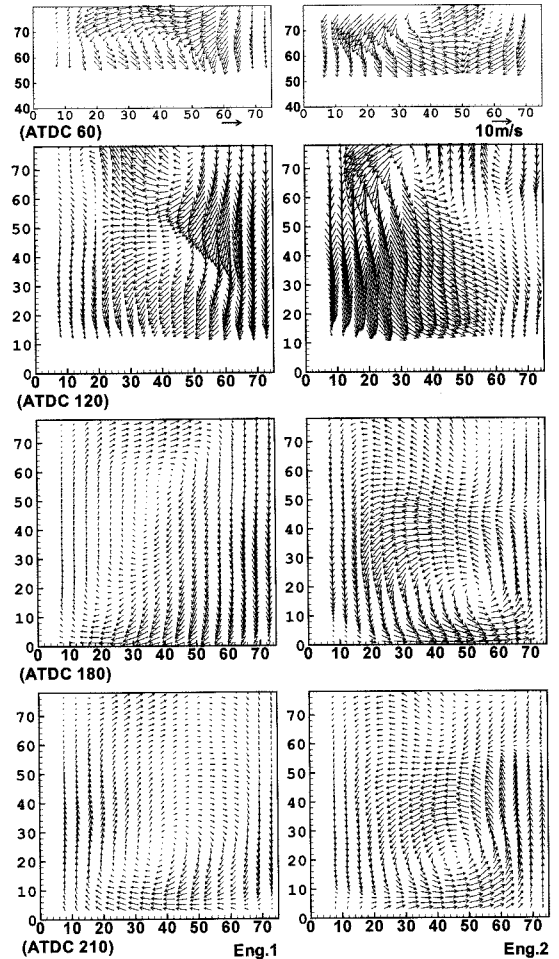


Fig. 8 Velocity field of rear valve center plane

실린더 중심 단면과 비교할 때 상당한 차이점을 보여주고 있다. Eng. 1의 경우 흡입 행정 초기에 실린더 중심 단면에서는 밸브 상단을 통과하는 주 유동이 약하게 관찰되었지만 밸브 중심 단면에서는 강한 유동이 관찰되고 있다. 특히 이 주유동의 일부는 실린더를 가로질러 다시 흡기 쪽으로 역류를 하고 일부는 실린더의 하방으로 이동한다.(ATDC 60° CA) 이는 앞서 흡입 초기에 수평면 유동 중 밸브의 하면에 존재하는 역류와 매우 잘 일치한다. 조금 더 시간이 경과하면 수직면 유동은 실린더의 상방을 향하는 유동과 하방을 향하는 유동 두 부분으로 뚜렷이 구분되어 서로 방향이 다른 두개의 팀블 유동을 형성한다. 이는 실린더의 중심 단면 즉 두 흡입 밸브의 사이의 단면 유동과 확실히 구분된다.

전측 및 후측 밸브 중심 단면의 유동이 크게 다르지 않으므로 전체적으로 종합하면 흡입 초기 및 중기에 각 흡입 밸브 하면에는 두개의 작은 텀블 유동이 존재하고 실린더 전체적으로는 큰 스케일의 텀블 유동이 존재하는 형태가 되어 3개의 텀블 유동이 존재한다고 볼 수 있다. BDC와 흡기 말기의 유동은 실린더 중심 단면의 유동과 유사하게 큰 규모의 텀블 유동을 형성하나 텀블의 중심은 중심 단면 유동보다 실린더의 아래에 존재하는데 이는 밸브 중심면의 경우 실린더 종방향 유동이 더 빠르고 깊숙하게 실린더로 진입한 결과로 사료되며 종방향 속도가 더 빠른 협각 엔진에서 관찰된 결과와도 잘 일치한다.

밸브 중심면과 실린더 중심 단면의 수직 단면 유동을 검토한 결과 대체적으로 통상적인 2 흡기 밸브 엔진의 흡입 유동은 Fig. 9와 같은 형태로 판단된다.

협각 엔진인 Eng. 2의 경우는 전체적으로는 실린더 중심면의 유동과 유사한 형태를 지닌다. 그러나 흡입 초기에 실린더 상부의 텀블 유동이 중심 면에서는 확실히 관찰되지 않은 반면 밸브 중심면 유동에서는 Eng. 1과 마찬가지로 밸브의 하면을 가로지르는 텀블 유동이 확실히 관찰되고 있으며 그 출현도 Eng. 1보다 빨리 나타나고 있음을 알 수 있다. (ATDC 60° CA) 곧 이어 실린더 상부에 강한 텀블 유동의 중심이 형성되지만 곧 소멸되고(ATDC 120° CA - BDC) 이어 흡입 주 유동에 의한 매우 큰 스케일의 텀블 유동이 형성된다. 이 큰 스케일의 텀블은 흡기 행정 말기까지 강하게 존재하고 텀블의 중심은 BDC에서는 실린더 중심 면과 위치가 비슷하나 흡입 말기에는 실린더 중심 면에 비해 실린더의 상부로 조금 이동해 있음을 알 수 있다. Eng. 2의 이러한 수직 유동 면 특징도 Fig. 9에 도시하였다.

Eng. 2 경우 텀블 중심면의 위치가 Eng. 1과 달리 대체로 텀블 유동의 중심이 실린더의 하부에 위치하고 실린더 중심 면과 밸브 중심 면 유동의 중심이 동이 반대의 경향을 보이는 이유는 다음과 같이 판단된다. Eng. 2의 경우 실린더 종 방향의 유속이 빠르기 때문에 흡입 유동이 빠른 시간 내에 실린더 깊숙이 진입하므로 텀블의 중심이 대체로 아래에 존재하고 일단 종방향 유동이 피스톤의 상부와 충돌하면서 유속이 저하되어 실린더 중심면에서는 텀블

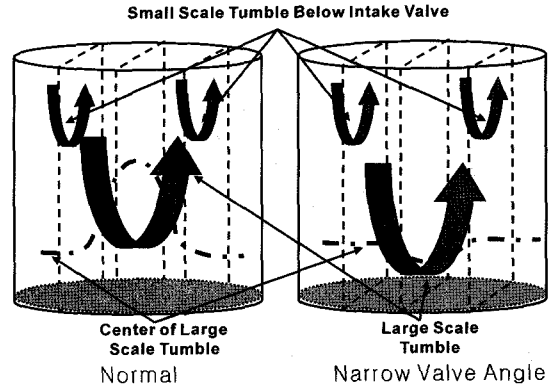


Fig. 9 Tumble Pattern of Engine during Intake Stroke

유동의 바닥 쪽 즉 피스톤 상부의 성분이 약화되어 텀블 중심이 낮아지는 반면 밸브 중심면의 경우 하향 유동이 충분히 강하여 마찰에 의해 유동 속도가 저하되어도 바닥 쪽의 유동이 상당한 속도를 가지기 때문으로 판단된다.

4. 결론

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

- 1) 밸브 각이 작은 즉 흡입 밸브가 직립에 가까운 협각 엔진의 유동이 종방향 유동 성분이 반경이나 수평면 성분보다 훨씬 강하기 때문에 이 유동의 영향이 지배적으로 나타나 전체적으로 잘 정돈된 형태의 유동 분포 특성을 보여 준다.
- 2) 수평면 속도 성분이 상당히 큰 통상적인 엔진은 흡입 도중 수평면 유동에서 여러 형태의 유동이 발생하고 소멸하는 복잡한 형태의 유동을 보여 준다
- 3) 흡입 밸브가 거의 닫힌 시점에서 피스톤이 상승하기 시작하면 통상적인 엔진의 경우 수직 방향의 속도가 급격히 저하되지만 협각 엔진은 상당 부분 보존이 된다.
- 4) 두 엔진 모두 흡입 초기에 밸브 밑에 작은 규모의 텀블 유동이 발생하고 실린더 전체에 걸친 큰 규모의 텀블을 생성하지만 통상 엔진은 텀블이 약하고 텀블의 중심이 실린더 중심 면에서 높고 밸브 면에서 낮은 반면 협각엔진은 강한 텀블이 발

생하며 텀블의 중심이 밸브 면에서 더 높은 특성을 보여 준다.

References

- 1) 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.
- 2) 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.
- 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 II-With Low/Medium Swirl," Transactions of KSAE, Vol.9, No.3, pp.9-17, 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 III-With High Swirl," Transactions of KSAE, Vol.9, No.3, pp.18-26, 2001.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) I. Y. Ohm and C. L. Myung, "In-Cylinder Flow Measurement Using PIV," Spring Conference Proceedings, Vol.1, KSAE, pp.80-87, 2002.