

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.10.761

# 나선형 포트를 적용한 광각엔진에서 실린더 내 흡입 유동 특성

엄인용<sup>†</sup> · 박찬준<sup>\*</sup>

(2008년 5월 7일 접수, 2008년 8월 21일 수정, 2008년 9월 19일 심사완료)

## In-Cylinder Intake Flow Characteristics of Helical Port Engines with Wide Valve Angle

Inyong Ohm and Chanjun Park

**Key Words:** PIV(Particle Image Velocimetry, 입자영상유속계), Valve Angle(밸브 각), Helical Port (나선형 포트), In-Cylinder Flow(실린더 내부유동), Swirl(와류)

### Abstract

This paper is the first of 2 companion papers which investigate in-cylinder swirl generation characteristics in helical port engine with wide valve angle. Two wide valve-angle engines, which are same ones and have slightly different rig swirl number, were used to compare the characteristics of cylinder-flow. One intake port is deactivated to induce swirl flow. A PIV (Particle Image Velocimetry) was applied to measure in-cylinder velocity field during intake stroke. The results show that the intake flow component passing through valve area near the cylinder wall is not negligible in helical port engine with wide valve angle contrary to conventional one. The effect of this velocity component on in-cylinder increases as the swirl ratio rises and intake process progresses. Consequently, this component interferes the formation of in-cylinder swirl flow resulting in lower actual swirl.

### 1. 서론

내연기관에서 흡입 유동 특성은 중요한 성능 파라미터로 사용되고 있으며, 대부분 정상 유동 장치를 이용하여 와류 값 및 텀블 값 등을 평가하여 그 특성을 정의한다. 정상 유동 장치는 엔진 내부의 유동을 상당히 잘 모사한다고 알려져 있고<sup>(1,2)</sup> 특히 흡입 유동의 모사 특성은 매우 우수하여<sup>(3,4)</sup> 정상 유동으로 정의한 유동 특성과 엔진의 성능 사이에는 비교적 양호한 상관관계가 존재한다. 따라서 이를 방대한 데이터베이스로 구축하여 엔진의 성능 개발에 폭 넓게 사용하고 있다. 그럼에도 불구하고 정상 유동에서 정의한 유동 특성과 실물 엔진의 내부 유동 사이의 관계

는 아직 충분히 알려져 있지 않다.<sup>(5)</sup>

한편 실린더 내부의 유동은 기본적으로 밸브 각, 포트 각을 포함한 거시적인 흡기계의 구성과 포트의 형상에 지배를 받는다. 디젤 엔진의 경우 밸브가 대부분 실린더와 수직으로 장착되어 밸브 각도가 없고 포트 각도 크지 않으므로, 실린더 내부 유동이 와류 위주로 형성되며 비교적 단순한 형태를 지니고 있다. 반면 가솔린 엔진은 밸브 각과 포트 각이 10-30° 범위에 걸쳐 있기 때문에 실린더로 진입하는 유동의 초기 성분이 다양하게 존재하여 이에 따라 매우 복잡한 형태의 내부 유동이 형성된다.<sup>(6,7)</sup> 이러한 이유로 정상 유동에서 정의한 유동 특성 값을 이용하여 실물 엔진의 성능 특히 축상성증화와 관련한 성능의 예측에 어려움을 주는 경우가 발생하는데, 이러한 현상은 밸브 각이 클수록 두드러지게 나타난다.<sup>(8)</sup> 이러한 맥락에서 밸브의 각도에 따른 내부 유동의 형성 과정과 특성을 파악할 필요가 있고 본 연구의 이전 연구에서는 저 와류 발생 포트에 대

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 서울산업대학교 기계공학과  
E-mail : iyohm@snut.ac.kr  
TEL : (02)970-6311 FAX : (02)949-1458  
<sup>\*</sup> 서울산업대학교 기계공학과

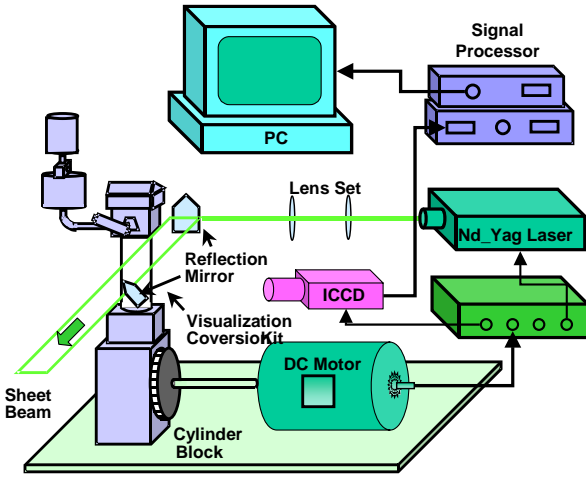


Fig. 1 Schematics of PIV measurement

해 통상적인 밸브 각을 갖는 엔진과 협각 엔진의 와류 발생 특성을 비교하였다. 여기서 밸브 각 변경에 따른 와류 발생의 특성을 파악하여 협각 엔진이 와류가 없는 경우에는 안정된 유동 특성을 지니고 있고 와류 발생 시에도 매우 우수한 발생 특성을 가지고 있음을 확인하였다.<sup>(6-9)</sup> 본 연구에서는 밸브 각이 크고 고 와류 발생을 위해 나선형 포트를 채용한 엔진에서 흡입 행정 중 실린더 내부 유동 특성을 파악하였다.

### 2 실험 장치

유동 측정에 사용된 PIV 시스템은 Fig. 1에, 측정 대상인 두 엔진의 제원은 Table 1에 측정 위치 및 시기는 Table 2에 나타내었다.

Fig. 2는 밸브 각의 정의 및 측정 위치와 향후 그림으로 제시될 속도 측정 결과의 기본 좌표 구성에 대한 것이다. 수평 측정면과 수직 측정면을 나타낸 그림에서 점선은 실제 엔진의 경계에 해당하고 점선은 측정 가능한 가시화 영역을 나타낸다. 엔진은 대표적인 부분부하 조건에 해당하는 1800 RPM, 흡기관 절대압 50 kPa 조건으로 운전하였다. 장치에 대한 자세한 설명은 본 논문의 이전 논문에 기재되어 있고 PIV 알고리즘은 32x32 pixel interrogation area, 25% overlap, and 5x5 averaging area이다.<sup>(6,7,9)</sup> 속도 데이터는 각 시기 및 위치별로 10-30회 측정하여 이를 앙상블 평균한 것이다. 와류의 발생은 두 엔진 공히 엔진의 전측 포트의 유동을 차단하고 후측 나선형

Table 1 Specification of engine

		Eng. 1	Eng. 2
No. of Valve(In./Ex.)		2/2	
Intake Port(Front/Rear)		Straight/Helical	
Intake Valve Angle		25°	
Valve Timing		5/35, 43/5	
Combustion Chamber		Semi Wedge	
Bore(mm)/Stroke(mm)		75.5/83.5	
Steady	Swirl(RS)	5.5	6.5
Flow	Tumble	1.1	1.2

Table 2 Measurement position and timing

Measuring Plane	Horizontal	Vertical
	TDC - 7 mm TDC - 19 mm TDC - 41 mm TDC - 77 mm	Rear Valve Center Cylinder Center Front Valve Center
Measuring Timing	60, 120, 180, 210 (Intake ATDC)	

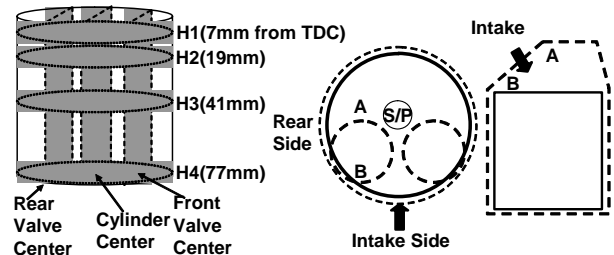


Fig. 2 Definition of valve angle and measuring position

포트만 흡기에 이용함으로써 고 와류를 유도하였다. 이전 연구에서 와류 값 0, 2.2, 3.3에 대해 다루었기 때문에 본 논문에서는 5.5와 6.5에 대해 논의하겠다.

### 3. 결과 및 해석

Fig. 3에 흡입 밸브가 열린 후 흡입 ATDC 60° CA에서 측정한 흡입 초기의 수평면 그리고 Fig. 4에 수직면 속도 분포를 제시하였다. 평면 유동을 나타낸 그림에서, 상기에서 언급한 바와 같이 점선의 원은 실린더의 실제 보어이고 실선의 원은 관측 가능한 투명 연장 피스톤의 가시화 창을 나타내며 일점쇄선은 수직면 유동 측정 단면을 나타낸다. 수직면 유동을 나타낸 그림에서도 일점쇄선은 수평면 유동 측정 단면을 나타내고 굵은 점선은 측정 당시 피스톤의 위치를 나타낸다.

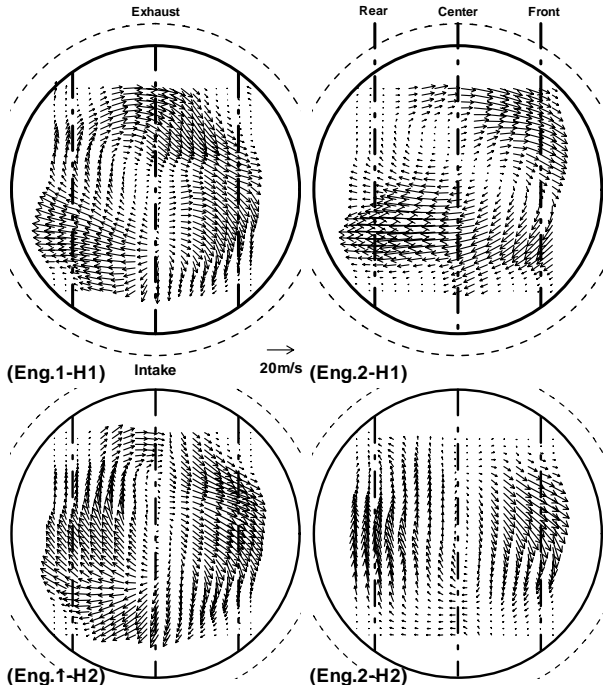


Fig. 3 Horizontal velocity field at early intake stage (ATDC 60°C), H1 : 7mm , H2 : 19mm from TDC

우선 수평면 유동을 관찰하면 흡입 초기 두 엔진 모두 실린더 상부인 H1 평면에서부터 대체로 와류 형태의 유동이 나타남을 볼 수 있지만 그 구체적인 양상에는 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. Eng. 1의 경우(RS=5.5) H1, H2 평면에서 중심 주변의 속도 분포로 와류 중심을 계산하면, 와류 중심은 실린더 중심에 대해 오른쪽으로 1.5mm, 아래쪽으로 1.2mm 편심되어 있다. 실린더 Bore가 75.5mm이므로 이 정도면 실린더 중심과 잘 일치한다고 할 수 있다. 속도 분포도 비교적 균등한 잘 발달된 와류 형태가 나타나고 있다. 수직면 유동과 종합하여 판단하면 후측의 와류 성분은 밸브의 하단(Fig. 2의 B 방향)을 통과한 성분이 그리고 실린더 중심과 전측의 와류 유동은 밸브 상단(Fig. 2의 A 방향)을 통과하여 전측 배기 밸브 쪽으로 대각 방향으로 연소실을 횡단한 유동에 의한 것임을 알 수 있다. 속도가 비교적 낮게 측정된 부분은 두 유동 성분의 충돌에 의하여 속도가 줄어든 것으로 판단된다. 결과적으로 Eng. 1의 경우 밸브 상단을 통과한 유동이 와류 형성을 주도한다.

Eng. 2(RS=6.5)에서는 H1 평면에서 흡입 밸브의 좌측과 하부의 유동이 강하게 형성되고 있고 또한 그 대각 위치 즉 전측 배기 밸브 위치에서

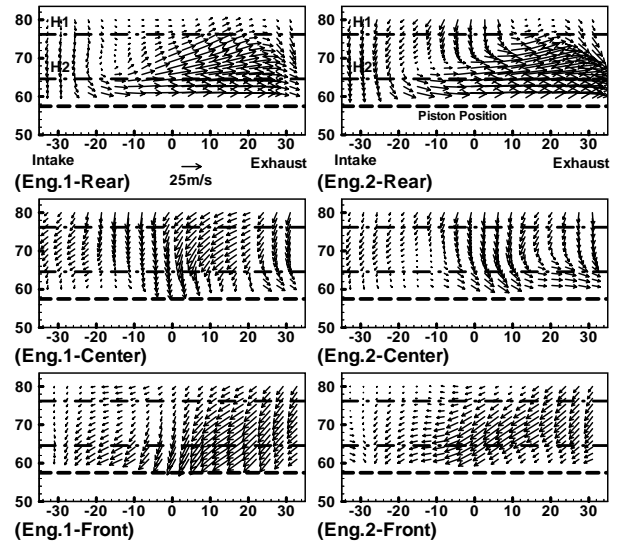


Fig. 4 Vertical velocity field at early intake stage (ATDC 60°C)

강한 유동이 형성되고 있다. 그리고 조금 내려온 H2 평면에서는 그 중심이 실린더 중심과 일치하는 와류 거동이 관찰되지만 속도는 좌우측의 유동이 강하여 불균등하게 분포되어 있다. 이 유동을 수직면 유동과 종합하여 해석하면, 평면상에서 발생한 와류 유동의 발생 메커니즘은 기본적으로 Eng. 1과 동일하지만 상단과 하단을 통과하는 유동의 강도가 비슷하거나 때로는 하단을 통과한 유동이 와류 형성에 지배적 역할을 하며, 강도가 비슷한 두 유동의 충돌에 의해 속도가 저하되는 부분이 뚜렷이 나타나고 있다고 판단된다.

수직면 유동의 경우, 나선형 포트가 장착된 후측 평면에서 두 엔진의 흡기 거동은 매우 유사하다. 나선형 밸브의 하단 즉 실린더 벽면에 인접한 곳에서 진입한 유동 성분은 실린더를 가로질러 배기 밸브가 있는 반대편으로 역 텀블 유동 형태로 진행한다. 두 유동의 차이점은, Eng. 1은 반대 쪽 벽면 부근에서 밸브의 상단을 통해 진입하여 연소실을 횡단하여 진입한 유동과 충돌하여 실린더 상부에서는 아래쪽으로 약간 방향이 변경되는데, 이에 반해 Eng. 2는 밸브의 상단을 통해 진입한 유동이 포트의 유동 저항에 의해 상대적으로 약화되었기 때문에 두 유동이 충돌하여도 벽면을 향하는 유동이 강하게 형성되어 있고, 이 유동에 밀려 밸브 상단을 통과한 유동은 실린더의 중심 쪽으로 진행하고 있다.

밸브의 상단과 하단을 통과한 두 유동 성분의

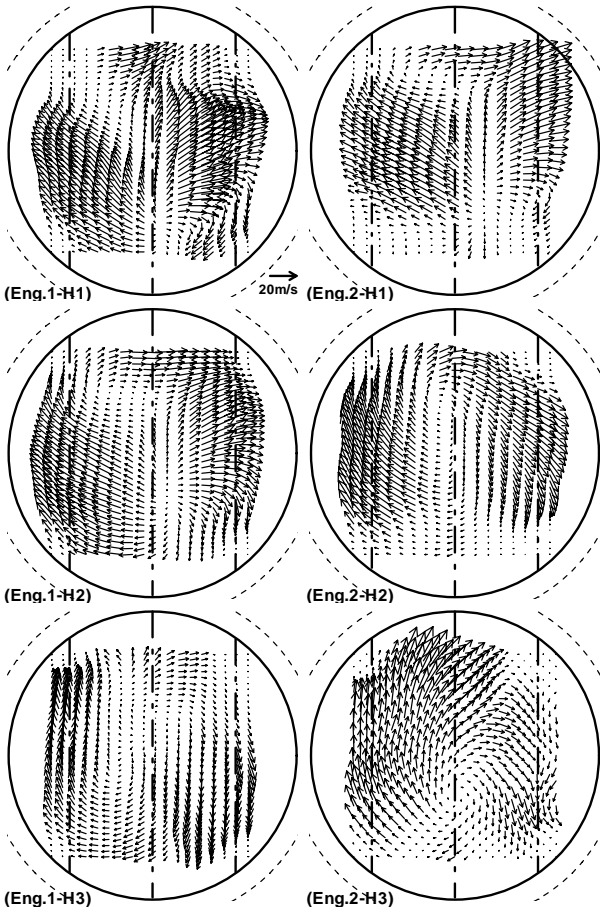


Fig. 5 Horizontal velocity field during intake (ATDC 120°CA), H1 : 7mm , H2 : 19mm, H3 : 41mm from TDC

상호 작용은 실린더 중심 단면과 전측 단면에서 동일한 경향을 보여 주고 있다. 즉 중심 단면에서, Eng. 1의 경우 상단 통과 유동 성분이 강하여 약한 순 방향 텀블 유동의 형태를 보여주는 데 비해, Eng. 2는 여전히 하단 통과 성분이 강하여 실린더 하부는 역방향 그리고 상부는 순방향 텀블의 형태가 혼재되어 있다. 전측 단면에서는 두 엔진 모두 전체 평면에 걸쳐 순방향의 텀블 유동 형태를 보여주지만, Eng. 1의 경우 수직 방향 유동이 강하게 존재하고, 반면 Eng. 2는 전체 평면에 걸쳐 수평 유동 성분이 상대적으로 강한데, 이는 흡입 와류 성분이 상대적으로 더 큰데서 기인한 것으로 판단된다.

흡입 초기 수평면과 수직면 유동 측정 결과를 종합하면 전체적으로 흡입 유동은 와류 유동의 형태로 유입되지만 와류 값이 클수록 상대적으로 밸브의 상단을 통과하는 유동 성분이 약하게 형

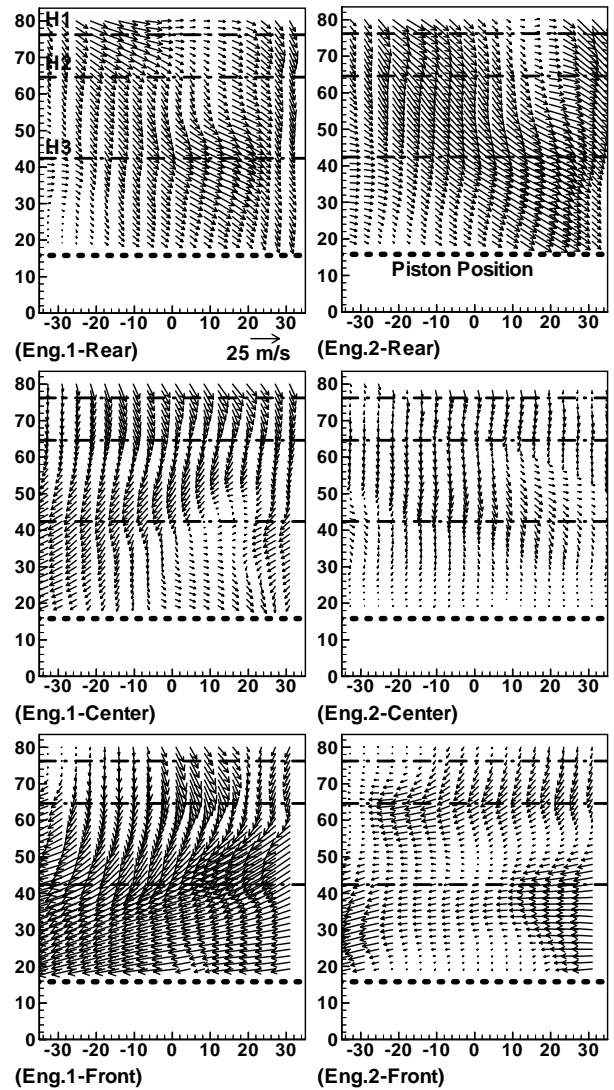


Fig. 6 Vertical velocity field during intake (ATDC 120°CA)

성된다. 이로 인해 밸브 상단을 통과한 유동이 실린더 내부 유동 형성에 지배적 역할을 하지 못하고 강도가 비슷한 두 유동의 충돌로 충돌 지점에서 속도가 급속히 감소하는 현상이 나타난다.

Fig. 5와 Fig. 6에 흡입이 상당히 진행된 ATDC 120°CA에서 측정된 결과를 도시하였다.

Eng. 1의 경우 전체 평면에서 ATDC 60° CA와 유사한 유동 특성을 보여 주고 있는데, ATDC 60°CA와의 차이는 H1 평면에서 강한 와류 유동이 관찰되기는 하나, 평면의 우측 즉 전측 밸브가 있는 평면에 유동의 방향이 ATDC 60°CA보다 더 실린더 외각을 지향하고, 하류로 내려오면서 점차 유동이 정돈되는 특성을 보여주고 있다. 그

리고 두 유동의 충돌에 의해 속도가 감소하는 현상이 더 뚜렷이 나타나고 있다. H1, H2, H3 평면에서 형성된 와류 유동은 ATDC 60°CA와 발생 메커니즘이 동일한 것으로 판단되며, 다만 두 유동의 상대적 강도와 전체 유동 평면에서 측정면의 상대적 위치가 변동되어 나타난 것으로 판단된다. H3 평면은 전체 실린더에서 수직으로 중간에 해당하는 면인데, 측정 시기에서도 대체로 수직 유동장의 중심에 위치하고 있다. 이 평면에서 상대적으로 약한 와류가 관찰되는 이유는, 수직 유동 측정에서 나타난 바와 같이 실린더의 하방으로 향하는 종방향 유동이 강하게 형성되어 있기 때문이다. 이렇게 강한 종방향 유동은 밸브 양정이 높을 때 최대 피스톤 하강 속도에 의해 강한 유동이 유입된 결과로 판단된다.

Eng. 2의 경우에도 H1, H2, H3 평면의 유동 특성은 ATDC 60°CA에서와 발생 메커니즘이 동일한 것으로 판단된다. 다만 Eng. 1과 달리 밸브의 하단을 통과한 유동의 영향이 유동 형성에 더 지배적인 역할을 하고 실린더의 아래 쪽으로 진행할수록 이 경향이 강해짐을 알 수 있다.

수직면 유동 특성은, Eng. 1의 경우 흡입 초기보다 밸브 상단을 통한 유동이 상대적으로 강하게 형성되어 후측 평면 유동 일부를 제외하고 전체 유동장에서 지배적 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 특히 전측 단면 유동의 경우 종방향의 흡입 유동이 매우 잘 발달하여 실린더 하부 피스톤 상면까지 깊숙이 진행한다. 그러나 중심 단면과 전측 단면에서도 밸브 하단을 통과한 유동의 영향으로 유동 속도가 감소하는 현상이 관찰된다.

Eng. 2의 경우 밸브 후측 평면에서 밸브 하단을 통과한 유동이 지배적 역할을 하는 것은 Eng. 1과 동일하지만, Eng. 1보다 더 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 즉 Eng. 1에서는 배기 쪽의 실린더 벽면을 따르는 유동이 거의 수직으로 형성된 것에 비해, Eng. 2에서는 밸브 하단을 통과한 유동의 영향이 커서 실린더 벽을 향하는 유동 형태를 보여 준다. 중심 단면에서는 두 유동의 충돌로 수직 방향의 속도가 상당히 감소하였고, 두 유동의 형태는 어느 방향으로 진입한 유동이 지배적인지 뚜렷이 나타나지 않는다. 특이한 것은 실린더 하사점에서 50 mm 떨어진 배기 측에서는, 밸브 하단을 통과한 유동이 상단을 통과한 유동을 극복하여 역 방향의 텀블 유동 형상을

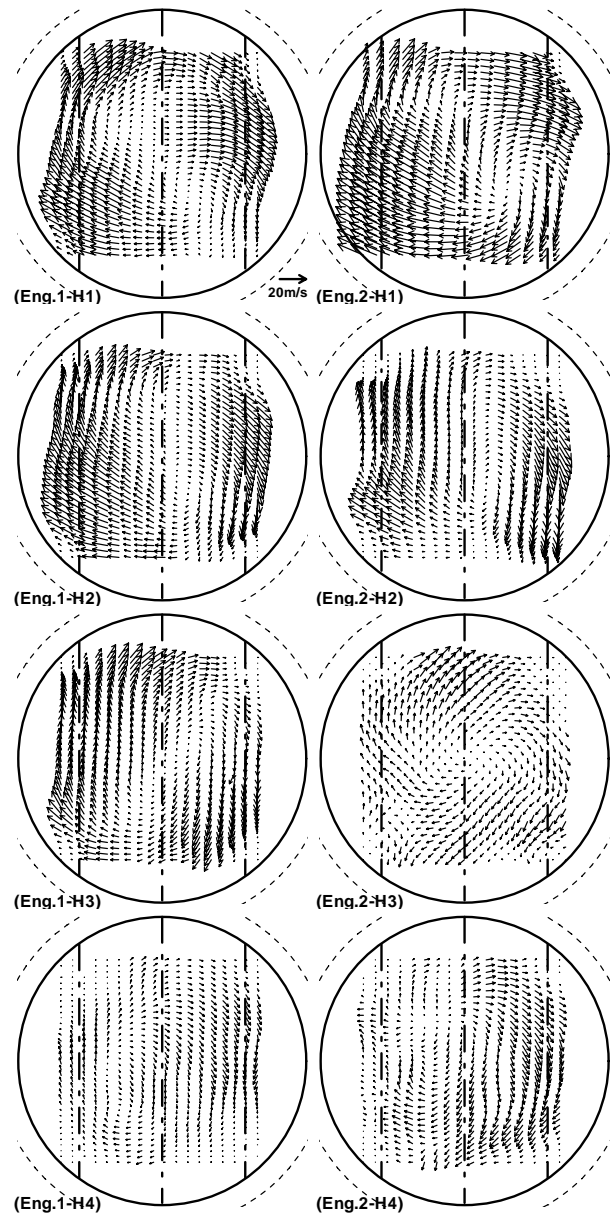


Fig. 7 Horizontal velocity field at BDC, H1 : 7mm, H2 : 19mm, H3 : 41mm, H4 : 77mm from TDC

을 보여 주고 있다. 이 현상은 Eng. 1의 40 mm 지점에서도 약하게 관찰된다. 또한 전측 평면의 유동은 Eng. 1과 매우 다른 특성을 가지고 있다. 우선 전체적으로 밸브 상단의 유동이 지배적으로 나타나 실린더 수직면에서 크게 돌아가는 순방향 텀블 유동의 형태를 보여주기에는 하지만, 실린더 높이 40-60 mm 그리고 20-30 mm 부근 두 곳에서 텀블 유동의 밸브 하단을 통과한 유동의 영향으로 속도가 현저히 감소하여 텀블 유동의 속도 분포가 매우 불균일해진다. 이에 따라 텀블 유동

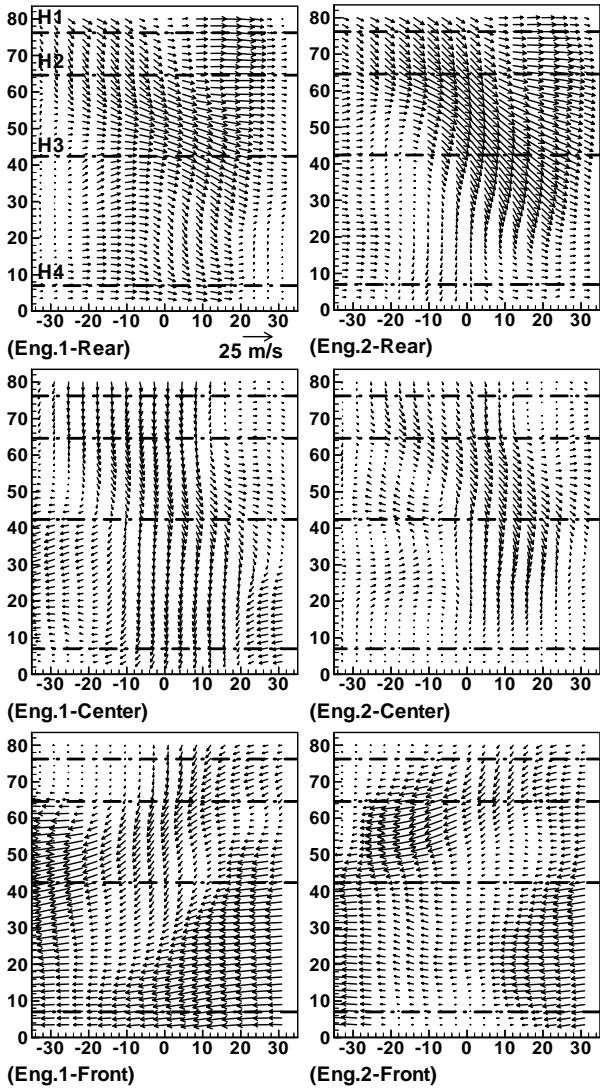


Fig. 8 Vertical velocity field at BDC

이 상하 두 개의 텀블로 양분되는 것 같은 형상을 보여준다.

Fig. 7과 Fig. 8은 피스톤이 BDC에 도달하였을 때의 측정 결과이다. 두 엔진 모두 수평면 유동은 기본적으로 와류의 형태를 지니고 있는데, 각 수평면에서 관찰되는 속도 분포의 불균일은 앞서의 경우와 동일한 이유 즉 두 개의 주 흡입 유동 성분의 충돌에 의한 것이다. 이 시기의 수평면 유동 특징은 Eng. 1의 경우 H3 평면까지는 120° CA에서의 유속과 큰 차이가 없고, 반면 Eng. 2의 경우 실린더 중심 평면 즉 H3 평면에서 와류의 속도가 급속히 감소되어 있다는 것이다. 그리고 H4 평면의 유동은 두 엔진 모두 낮게 측정되었다. 통상적으로 BDC에서 실린더의 하방 피스톤

근방에서는 유입된 흡입 유동이 피스톤에 의해 진행에 방해받아 수직 유동 성분이 모두 수평 유동 성분으로 전환되어 유속이 증가하거나 최소한 감소하지는 않는데<sup>(6,9)</sup> 이 경우는 매우 예외적이다.

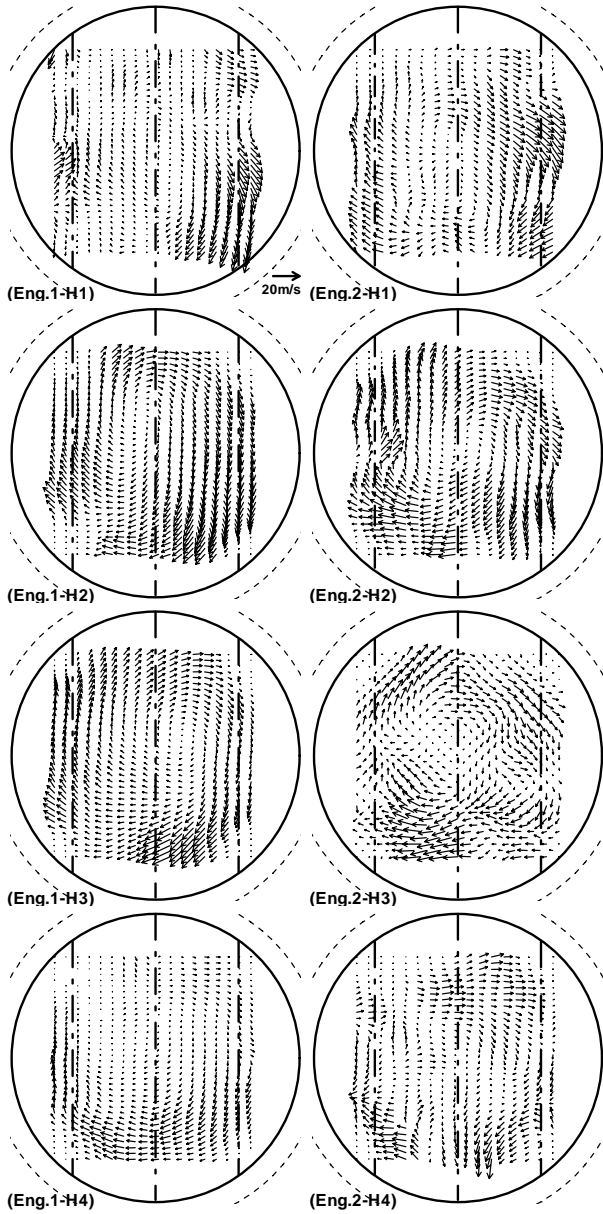
우선 Eng. 2에서 H3 평면의 유동 속도가 급속히 줄어든 이유는 수직면 유동에서 관찰되듯이 이 시기에 밸브 하단 통과 유동의 영향이 공간적으로 확대되면서 유동 충돌에 의한 속도 감소 영역이 확대되어 나타난 것으로 판단된다. 가장 낮은 위치에 있는 H4 평면에서 유속의 감소도 이와 동일한 이유인 것으로 판단된다.

수직면 유동은 BDC에 이르러 이전 시기와 매우 다른 현상을 보여주고 있다. 먼저 이 시기에 수직면의 유동은 두 엔진 모두 급속히 감소하는데 이는 하향 운동을 하는 피스톤이 최대 피스톤 속도 지점을 지나 감속을 시작하여 BDC에서 멈추기 때문에 나타나는 당연한 결과로 판단된다.

이 시기에 나타나는 특징적인 현상은 Eng. 1의 중심 단면에서도 밸브 하단을 통과한 유동의 영향이 크게 나타나 150°CA에서 Eng. 2의 중심 단면에서 발생한 현상과 동일한 현상이 발생하여 역 텀블 방향이 유동이 뚜렷이 관찰된다는 것이다. 그리고 Eng. 2에서는 이 현상이 150°CA 보다 더 강하게 나타나 방향이 서로 다른 세 개의 텀블 유동이 관찰된다. 두 개의 텀블 중 실린더 상부의 배기 측에 형성된 역 방향 텀블은 밸브 하단 통과 유동에 의해 형성된 것이고, 흡기 측 피스톤 상부와 30-40mm 부근에서 형성된 순방향 텀블은 밸브 상단 통과 유동이 하단 유동 통과 유동에 의해 양분되어 형성된 것으로 판단된다.

전측 단면의 수직 유동은 Eng. 1의 경우 약하게 나타나던 밸브 하단 통과 유동의 간섭이 심해져서 유속이 감소하는 영역이 뚜렷이 관찰되며 Eng. 2의 경우 이미 이전 시기에 나타났던 이 현상이 심화되어 속도 유실 부분의 영역이 더 확대되어 있음을 알 수 있다. 따라서 이 시기에 도달하면 Eng. 1의 경우에도 전측 단면을 제외하면 밸브 하단을 통과하는 유동이 실린더 내 유동을 지배함을 알 수 있다.

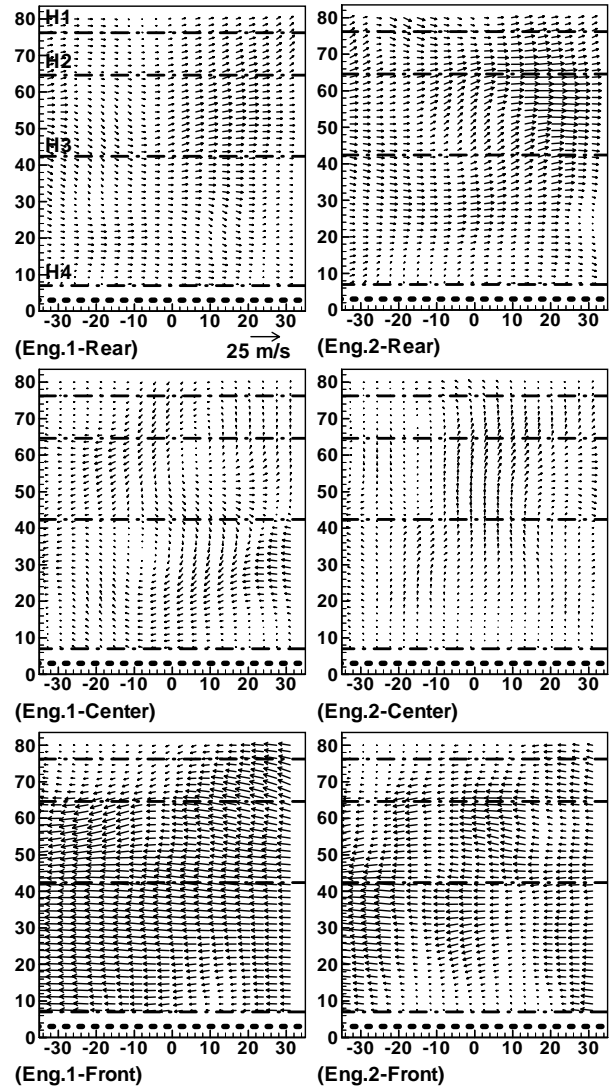
Fig. 9와 Fig. 10은 ATDC 210°CA의 측정 결과로 이 시기는 흡기 밸브가 실질적으로 닫히는 시기에 해당한다. 중요한 사실은 BDC부터 이 시기까지 흡입 밸브는 열려있고 부분 부하 상황이며



**Fig. 9** Horizontal velocity field at intake valve closing timing (ATDC 210°CA), H1 : 7mm , H2 : 19mm, (H3) : 41mm , (H4) : 77mm from TDC

로 흡기계에서 발생하는 각종 동적 효과는 없기 때문에, 상향하는 피스톤에 의해 흡기관으로의 역류가 발생한다는 것이다

먼저 수평면 유동에서 특징적인 현상은 두 엔진 모두 전 평면에 걸쳐 와류의 속도가 급속히 감소하였다고 형태도 매우 불규칙하게 변한 것이다. 통상적인 경우 이 시기의 유동은 BDC에서의 유동과 크게 다르지 않고, 와류 거동이 존재하는 경우 오히려 유동은 잘 정돈되는 경향이 있는데 이러한 현상과



**Fig. 10** Vertical velocity field at intake valve closing timing (ATDC 210°CA)

는 전혀 일치하지 않음을 알 수 있다.

이 두 가지 특이 사항은 이전과 마찬가지로 두 유동의 충돌이 야기한 결과로 판단된다. 즉 유속이 감소한 부분은 두 유동의 충돌이 발생한 지점이고 수직면 유동에서 관찰되듯이 후측 단면과 중심 단면에서 유동은 두 유동의 속도가 급속히 감소하고 역시 불규칙하게 변화하였음을 알 수 있다.

수직면 유동 특성은 후측 단면의 경우 두 엔진 모두 흡기에서 배기 측을 향하는 유동이 형성되어 있음을 알 수 있는데, 이 유동은 수평면의 와류 거동이 관찰된 결과이다. 이 경우 밸브 하단 통과 유동의 영향이 더 강한 Eng. 2의 유동이 더 큰 유속을 가지고 있으며 이는 평면 유동에서도

관측된다.

Eng. 1의 중심 단면 유동은 매우 복잡한 형태를 지니고 있다. BDC에서 Eng. 2의 중심 단면에서 여러 개의 텀블이 관측된 것과 마찬가지로 여기에서도 작은 규모의 텀블이 관찰되는데, 즉 배기 측 실린더 하단의 역 방향 텀블, 실린더 중심 부근의 순 방향 그리고 흡기 측 실린더 상단의 역 방향 텀블이 관측된다. Eng. 2의 중심 단면 유동은 매우 약한 상태이고 실린더 높이 40mm부근에서 소규모의 순 방향 텀블이 형성되어 있다. 전측 단면 유동은 다른 단면에 비해 잘 정돈되어 있음을 알 수 있는데 하단 통과 유동의 간섭을 덜 받는 Eng. 1 유동의 정돈 상태가 양호하다. 두 엔진에서 모두 주 유동 방향은 배기에서 흡기 측이며 이는 후측 단면과 마찬가지로 수평면의 와류 성분이 관측된 결과이다

#### 4. 결 론

고 와류 발생을 위하여 나선형 포트를 밸브 각이 큰 엔진에 적용하였을 때 실린더 내 유동을 PIV로 관측한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 나선형 포트를 밸브 각이 큰 엔진에 적용하면 통상적인 엔진에 비해 밸브 하단을 통과하여 실린더로 진입하는 유동 성분의 영향이 크게 나타난다.

(2) 밸브 하단을 통과한 유동의 영향은 와류 값이 클수록 그리고 흡입 행정 초기보다 말기에 더 크게 나타난다.

(3) 두 유동의 충돌에 의하여 와류 속도 분포의 불규칙성이 발생하고 속도가 줄어 와류가 감소한다.

#### 참고문헌

(1) Bicen, A. F., Valfidis, C. and Whitelaw, J. H., 1984, "Steady and Unsteady Airflow through the

Intake Valve of a Reciprocating Engine," *ASME Winter Annual Meeting, Flows in Internal Combustion Engines-II*, FED-vol. 20.

- (2) Kastner, L. S., Williams, T. J. and White, J. B., 1963, "Poppet Inlet Valve Characteristics and Their Influence on the Induction Process," *Proc. of I.Mech. E.*, Vol. 178, No. 36, pp. 955~978.
- (3) Ohm Inyong and Cho Yongsuk, 2001, "In-Cylinder Fuel Behavior according to Fuel Injection Timing and Port Characteristics in an SI Engine : Part I-Without Swirl," *Transaction of KSAE*, Vol. 9, No. 2, pp. 19~27.
- (4) Ohm Inyong and Cho Yongsuk, 2001, "In-Cylinder Fuel Behavior according to Fuel Injection Timing and Port Characteristics in an SI Engine : Part II-With Low/Medium Swirl", *Transaction of KSAE*, Vol. 9, No. 3, pp. 9~17.
- (5) Heywood J. B., 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals," p. 345, MacGraw-Hill, New York.
- (6) Ohm Inyong and Park Chanjun, 2006, "In-Cylinder Intake Flow Characteristics according to Inlet Valve Angle" *Transaction of KSAE*, Vol. 14, No. 3, pp. 142~149.
- (7) Ohm Inyong and Park Chanjun, 2006, "In-Cylinder Compression Flow Characteristics according to Inlet Valve Angle," *Transaction of KSAE*, Vol. 14, No. 4, pp. 77~83.
- (8) Ohm Inyong and Park Chanjun, 2002, "Experimental study on axial stratification process and its effects (1)," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 16, No. 11, 1457~1469.
- (9) Ohm Inyong, Park Chanjun, Woo Sungdong and Jang Yeolsung, 2005, "Characteristics of Swirl Generation According to Inlet Valve Angle," 2005, *2005 Spring Conference Proceedings of KSAE*, Vol. 1, pp.191~198.