

흡입밸브 각이 실린더 내 와류 발생 특성에 미치는 영향(II)

엄인용* · 박찬준

서울산업대학교 기계공학과

Effect of Inlet Valve Angle on In-Cylinder Swirl Generation Characteristics(II)

Inyong Ohm* · Chanjun Park

Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received 3 April 2008 / Accepted 21 June 2008)

Abstract : This paper is the second of 2 companion papers which investigate in-cylinder swirl generation characteristics according to inlet valve angle. Two DOHC 4 valve engines, one has wide intake valve angle and the other has narrow valve angle, were used to compare the characteristics of swirl motion generation in the cylinder. One intake port was deactivated to induce swirl flow. A PIV (Particle Image Velocimetry) was applied to measure in-cylinder velocity field according to inlet valve angle during intake stroke. The results show that the flow patterns of narrow valve engine are much more stable and well arranged compared with the normal engine over the entire intake and compression stroke except early intake stage, and very strong swirl motion is generated at the end of compression stage in this engine nevertheless using straight port which is unfavorable for swirl generating. In the wide valve angle one, however, strong swirl motion induced during intake stroke is destroyed as the compression progresses.

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

1. 서론

가솔린 기관의 흡입 유동을 제어하여 강한 와류를 발생시키고, 이를 이용해 축상 성층화 연소를 구현하는 것은 여러 성층화 방법 중에서도 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다.¹⁻³⁾

축상 성층화를 실현하는 과정에서 압축 말기까지 강한 와류를 유지시키는 것이 매우 중요하며, 이를 위해 통상적으로 두 흡입 포트 중 한 포트를 나선형 형상을 갖도록 설계하여 강한 와류를 유도한다. 그러나 이 경우 포트에서 유도하는 강한 와류 못지않게 와류 특성을 왜곡시키는 역 텀블 유동을 적절히

억제해야 와류를 압축 말기까지 효과적으로 유지할 수 있다.^{4,5)}

와류와 텀블의 발생은 포트 형상에도 지배되지만, 기본적으로 밸브 각에 의해 주어지는 흡입 밸브 입구 유동의 초기 방향도 주요한 변수가 된다. 그러나 현재까지 입자영상유속계(PIV, particle image velocimetry) 등을 이용한 실린더 내 유동 해석은 정상 유동,^{6,7)} 국부적 유동 특성 파악,⁸⁾ 또는 한 단면의 측정 결과만 제시하여 유동에 대한 3차원적 정보 획득이 어려운 것이 대부분이다.⁹⁻¹³⁾ 또한 600-800 RPM 정도의 저속으로 운전하여 실물 엔진의 운전 상태와 거리가 멀다.^{9,11,12)}

이에 본 연구에서는 밸브 각이 와류 발생의 특성

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

에 미치는 영향을 파악하기 위해, 밸브 각이 서로 다른 두 엔진의 흡입 및 압축 유동을 입자영상유속계 (PIV, particle image velocimetry)를 이용해 측정하여 비교하였다. 이전 논문에서 흡입유동 특성에 대해 논의하였으며 본 논문에서는 압축 시 유동 특성에 대해 논의하고자 한다.

2. 실험 장치

유동 측정에 사용된 PIV 시스템은 Fig. 1에, 측정 대상인 두 엔진의 제원은 Table 1에 측정 위치 및 시기는 Table 2에 나타내었다. 와류의 발생은 두 엔진 모두 엔진의 전측(front) 포트의 유동을 차단하고 후측(rear) 포트만 흡기에 이용함으로써 흡입 와류를 유도하였다.

Fig. 2는 밸브 각의 정의 및 엔진 상부 연소실 및 흡기계 구성에 대한 개략도이고 Fig. 3은 측정 위치와 향후 그림으로 제시될 속도 측정 결과의 기본 좌

Table 2 Measurement position and timing

	Horizontal
측정 단면	TDC - 7 mm
	TDC - 19 mm
	TDC - 41 mm
	TDC - 77 mm
측정 시기	240, 270, 300, 320(Intake ATDC)

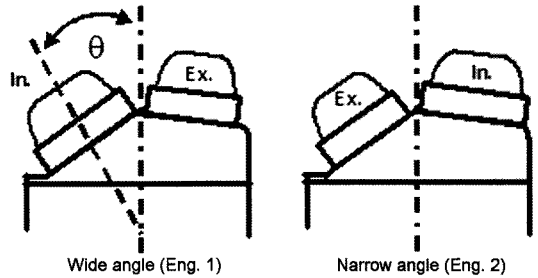


Fig. 2 Definition of valve angle and layout of engine

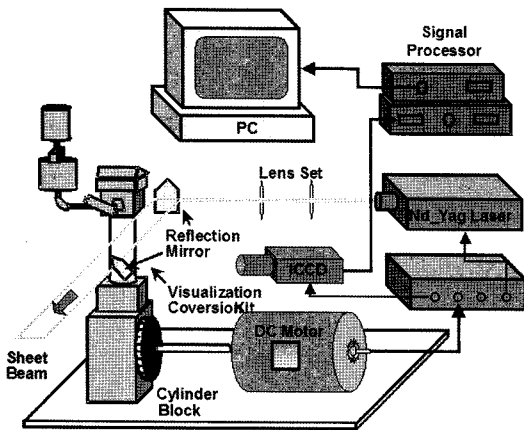


Fig. 1 Schematics of PIV measurement

Table 1 Engine specifications

		Eng. 1	Eng. 2
No. of valve	In.	2	←
	Ex.	2	←
Valve timing		5/35, 43/5	←
Combustion chamber		Semi wedge	←
Bore(mm)×Stroke(mm)		75.5 × 83.5	←
Max. valve lift		7.2	←
Steady flow (RVO)	Swirl	-3.3	2.2
	Tumble	2.12	-1.9

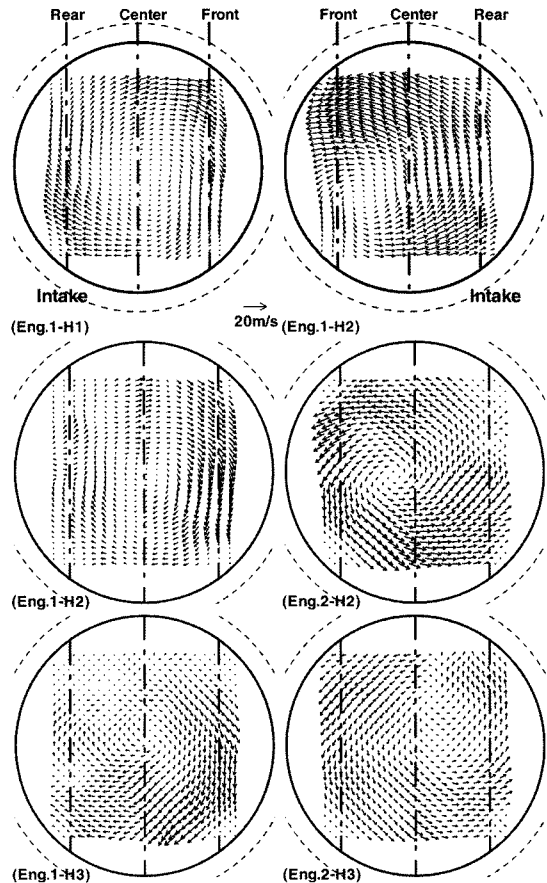


Fig. 3 Horizontal velocity field at ATDC 240° CA, (H1) : 7mm, (H2) : 19mm, (H3) : 41mm from TDC

표 구성에 대한 것이다. 그림에 표시된 바와 같이 밸브 각의 변경에 따라 흡입 밸브의 위치가 서로 반대 방향이지만, 이를 그림에 나타낼 때는 수평면의 경우 항상 흡입 밸브의 위치가 그림의 하면에 위치하도록 하였다. 따라서 그림 상에서 각 엔진이 사용하는 흡입 밸브 위치는 좌우로 서로 반대 방향에 있게 된다. 반면 수직 측정 단면에 대한 이 위치는 그림에서 변경하지 않고 사용하였다. 실린더 수평면과 수직면을 나타낸 그림에서 점선은 실제 엔진의 경계이고 실선은 관측 가능한 면을 나타낸다. 이후 수평 단면 속도를 나타낸 그림에서 점선의 원은 실제 엔진의 보어(75.5mm)이고 실선은 측정이 가능한 범위(직경 65.5mm)이다.

실험 장치 및 방법에 대한 자세한 설명은 본 논문의 이전 논문에 기재되어 있으므로 생략하였다.¹⁴⁾

3. 결과 및 해석

압축 유동의 논의에 앞서 흡입 유동 특성을 간략히 정리하면 다음과 같다.

흡입 초기(ATDC 60° CA)에 광각 엔진의 경우 밸브 상단(Fig. 2의 A 방향)과 하단(Fig. 2의 B 방향)을 통과한 유동의 강도가 비슷하여 두 유동이 실린더 내에서 충돌하고 있고, 반면 협각의 경우 밸브 상단을 통과한 유동이 훨씬 강해 지배적인 역할을 하지만, 와류의 발달은 광각엔진에서 더 잘 관찰된다.

흡입 중기(ATDC 120° CA)에는 초기보다 밸브 상단을 통과한 유동의 영향력이 증대하여 지배적인 유동이 되며, 협각에서 그 특징이 더욱 뚜렷이 나타나며, 흡입 말기(BDC)에 광각 엔진의 유동은 와류와 텀블이 모두 유동 충돌에 의해 왜곡되거나 약화되는 반면 협각 엔진에서는 일정한 형태가 잘 유지된다.

이후흡입 밸브가 닫힐 때(ATDC 210° CA)까지, 협각 엔진에서는 여전히 잘 발달한 와류와 텀블이 실린더 전체에 존재하는 반면 광각 엔진에서는 실린더 상부에는 강한 와류 거동이 존재하지만 하부는 왜곡된 형태의 와류가 나타나며 텀블 유동도 약화된다.

Fig. 4는 압축 초기 단계인 ATDC 240° CA에서의 수평면 속도 분포이다.

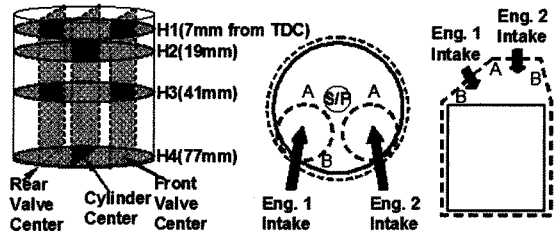


Fig. 4 Measurement plane and basic coordination system

압축이 진행되면서 광각 엔진(Eng. 1)의 전 평면에 상당히 잘 정돈된 유동이 존재함을 볼 수 있는데 이는 ATDC 210° CA에서의 유동과 유사하다. 그러나 H2 평면의 경우 정돈되었던 유동이 조금 흐트러지고 강도도 약해진 결과를 보여주고 있다.

협각 엔진(Eng. 2)의 경우 ATDC 210° CA와 마찬가지로 여전히 잘 정돈된 와류가 실린더 전 평면에 걸쳐있고 특히 실린더 최 상부인 H1 평면에서는 와류 유동이 이전보다 한층 강화되어 있다. H2와 H3 평면에서도 잘 정돈된 와류 유동이 존재하며 그 중심도 실린더의 중심에 거의 일치한다. 다만 H1 평면을 제외하고 그 이외의 평면에서는 와류의 강도가 이전 시기에 비해 약간 약화되었음을 볼 수 있다.

Fig. 5에 ATDC 240° CA에서 측정된 수직면 속도 분포를 제시하였다. 이 그림에서 수직 좌표 값(mm)은 BDC를 기준으로 한 실린더 종좌표이고 수평 좌표 값(mm)은 보어 중심을 기준으로 하였을 때의 반경 방향의 좌표이다. 이 시기의 수직면 유동 특성은 밸브 각에 따라 완전히 다른 특성을 보여주고 있다. 우선 광각의 경우 후측(rear) 평면에서 텀블 형태의 유동은 사라지고 우상향의 유동이 주를 이루고 있다. 또한 하면의 유동이 매우 약하며, 상면에서는 배기 측으로 평행하게 흐르는 유동이 관찰되는데 이는 실린더 상면의 와류 성분이 수직면에서 측정된 결과이다.

중심(center) 단면에서의 유동은 텀블 형태를 지니고 있으나 이전 시기보다 현저히 약화되어 있다. 또한 실린더 하면의 유동이 매우 약한 것도 후측 단면과 일치한다. 전측(front) 단면의 유동은 대체로 배기 측에서 흡기 측으로 흐르는 주 유동이 관찰되는데 이는 수평면 상의 와류 거동이 수직평면에서 관찰된 결과로 사료된다.

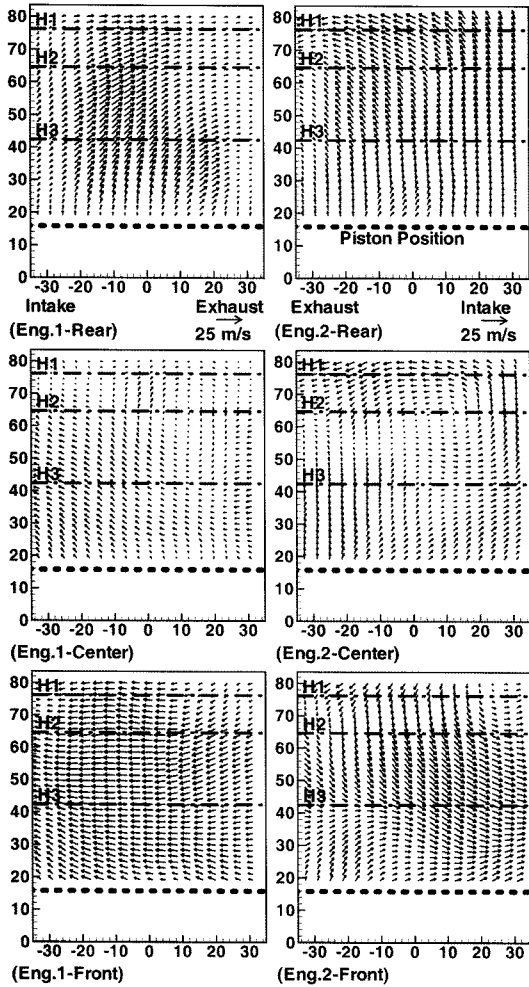


Fig. 5 Vertical velocity field at ATDC 240° CA

협각의 경우 광각과 달리 이전 시기와 큰 차이를 보이지 않고 있다. 전 평면에 걸쳐, 피스톤의 상승에 의해 텀블 유동이 약화되어 있지만 기본적인 형태에는 변함이 없다.

종합적으로 이 시기에는 광각엔진의 경우 이전 시기에 비해 유동의 정돈이 흐트러지거나 현저히 약화되는 반면, 협각 엔진에서는 유동이 다소 약화되기는 하지만 전체적으로 그 형태를 보존하고 있다.

Fig. 6과 7에 압축이 상당히 진행된 ATDC 270° CA 즉 점화 BTDC 90° CA에서 측정된 결과를 도시하였다.

광각 엔진의 경우 ATDC 240° CA에서의 상황이 지속되어 피스톤 상부 와류 유동이 흐트러지며 점

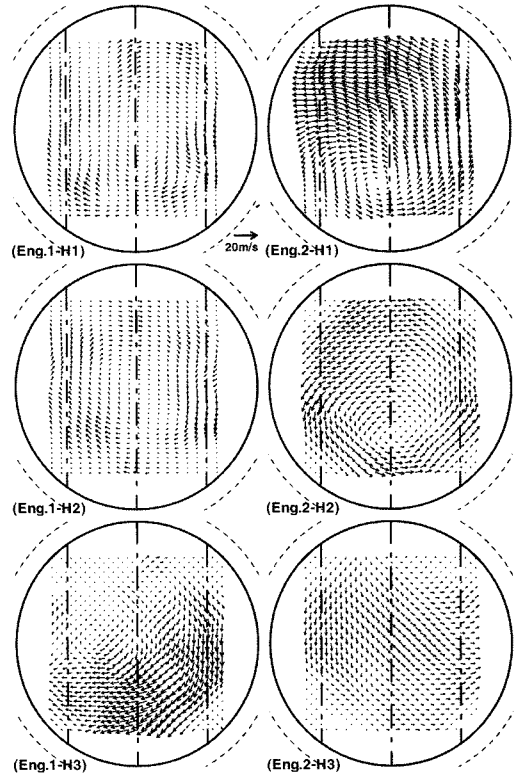


Fig. 6 Horizontal velocity field at ATDC 270° CA, (H1) : 7mm, (H2) : 19mm, (H3) : 41 from TDC

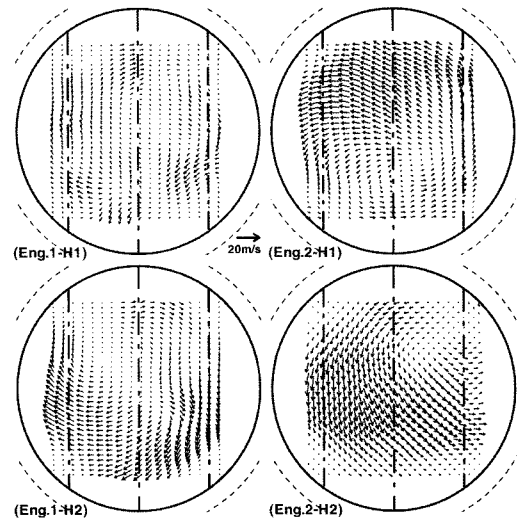


Fig. 7 Horizontal velocity field at ATDC 300° CA, (H1) : 7mm, (H2) : 19mm from TDC

차 약해진다. H3 평면에서는 이전 시기와 비슷한 형태이나 엔진 흡기 측에 더 강화된 유동이 관측되고

있다. 이는 압축 진행에 따라 유동의 수직 방향 성분은 줄고 운동량 보존에 의해 수평 방향의 속도 성분이 증가한 결과로 사료된다.

협각 엔진의 경우 실린더 상부의 와류 거동은 압축이 진행되어도 이전 시기에 비해 크게 변화가 없음을 알 수 있다. 와류의 중심은 흡기 쪽에 생성되어 있는데 이는 실린더 위에 있는 연소실 벽면이 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 배기 측이 기울어진 형태이기 때문에 유동의 중심이 밀려난 것으로 판단된다. H3 평면의 경우 와류의 형태를 지니고 있으나, 이전 시기에 그 거동의 중심이 실린더 중심과 잘 일치한 반면, 그 중심이 전측 배기 쪽으로 상당히 치우쳐져 있다. 흡입 거동에서 관찰한 바에 의하면 BDC 근방에서 실린더 하부의 유동은 와류의 형태를 가지지만 전측 평면의 속도가 매우 강하게 나타났는데, 압축 진행에 따라 피스톤 상면 바로 위에서 이러한 유동이 관찰되었기 때문으로 판단된다.

수직면 유동의 경우 광각엔진의 후측면 유동은 중심 축 주위의 유동이 여전히 강하다는 면에서 전체적으로 이전 시기와 비슷하지만, 배기 측의 유동이 상당히 약화되었음이 관찰된다. 중심 단면의 유동은 여전히 약하며 역시 이전 시기와 크게 다르지 않다. 전측 단면의 유동도 이전 시기와 크게 다르지 않으나 이전 시기에 배기 쪽에서 흡기 쪽으로 수평하게 흐르던 유동이 약간 상향으로 흐르는 차이가 관찰되는데 이는 피스톤의 상승에 의한 효과로 판단된다.

협각 엔진의 경우 전 평면에서 유동의 형태가 이전 시기와 매우 유사함을 알 수 있으며 강도도 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

전체적으로 이 시기에는 광각 엔진의 경우 유동이 점차 약해지고 그 형태도 흐트러지는 반면, 협각 엔진에서는 형태와 강도가 유지되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8과 9에 압축 말기에 해당하는 ATDC 300° CA(점화 BTDC 60° CA)에서의 측정 결과를 도시하였다.

광각 엔진의 경우 ATDC 300° CA에서 실린더 상부 H1 평면에서 와류 거동이 관측되고 있지만 여러 곳에서 그 형태가 왜곡되어 있다. 그 아래 H2 평면에서 ATDC 270° CA의 H3 평면 유동과 유사한 형태

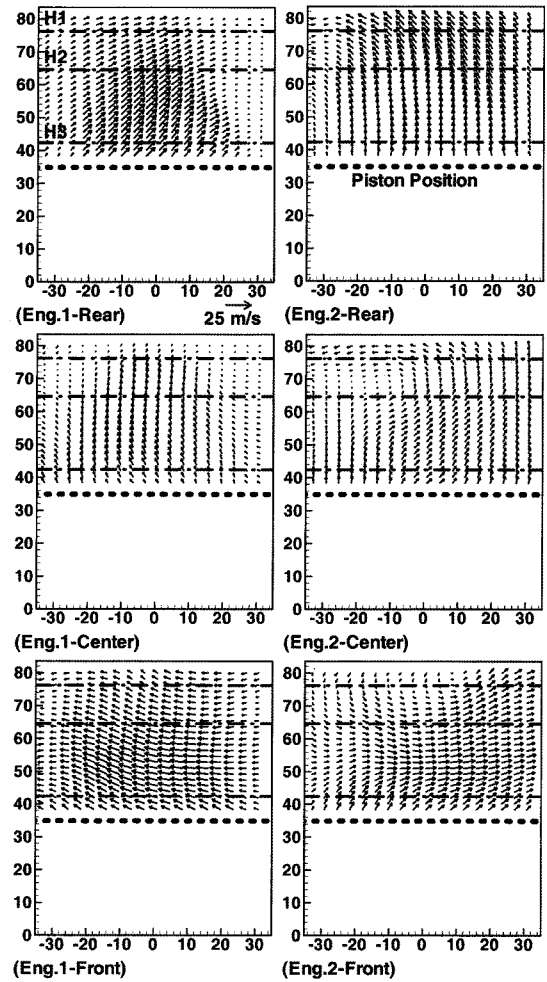


Fig. 8 Vertical velocity field at ATDC 270° CA

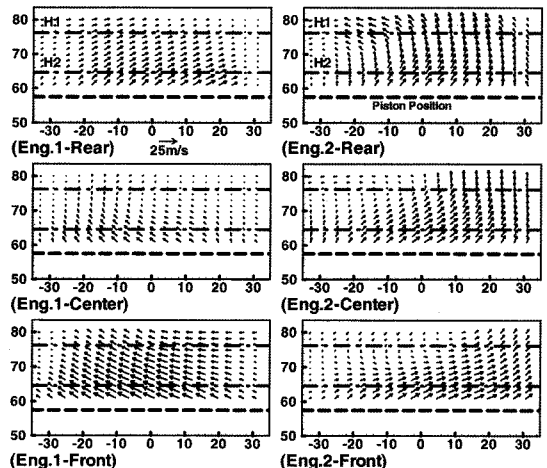


Fig. 9 Vertical velocity field at ATDC 300° CA

의 유동이 발견된다. 이에 반하여 협각엔진에서는 전체 실린더 평면에 걸쳐 속도 분포의 불균형이 관찰되지만 여전히 강한 와류가 관찰되고 있다.

수직면 유동의 경우 광각 엔진은 전체 평면에서 기본적인 특성은 ATDC 270와 같지만 유동의 강도가 현저히 약화되어 있음을 알 수 있다. 특히 후측 단면에서의 유동 약화 현상이 두드러진다. 협각 엔진의 경우도 유동의 형태에는 이전 시기와 큰 차이점을 발견할 수 없지만 그 강도는 약해져 있음을 볼 수 있다.

전체적으로 이 시기에는 광각엔진에서는 유동의 소멸과 약화가 지속되는 반면 협각 엔진에서는 유동의 약화는 다소 관측되지만 와류와 텀블 유동 모두 보존되고 있다.

Fig. 10과 11에 ATDC 320° CA(점화 BTDC 40° CA)에서의 측정 결과를 도시하였다. 실제 엔진 운전에서 이 조건에서는 BTDC 35 CA 근방에서 점화가 이루어지므로, 이 시기의 유동특성은 엔진의 연소 과정에 큰 영향을 주게 되어 매우 중요하다.

광각 엔진에서는 와류가 소멸되었거나 아주 약하게 거동한다. 이를 앞서의 결과들과 종합하면 광각 엔진의 경우 압축 행정 초기에 실린더의 상면에 강한 와류가 존재하고 중간 부분은 조금 약한 와류가 존재하며 하면에는 와류가 거의 발달하지 않는다. 압축 진행에 따라 실린더 상부의 와류는 형태가 왜곡되며 지속적으로 약화되고 오히려 실린더의 아래 쪽에서 와류가 생성된다. 이후 압축이 더 진행되어 말기에 도달하면 실린더 내의 와류는 점차 소멸된다. 여기서 실린더 위의 연소실로 진입한 와류는 관찰할 수 없으므로 어떠한 거동을 하는지 분명치는 않다. 다만 연소실은 실린더와 달리 와류 운동에 적합한 원형이 아닌 췌기 형이며, 여기에는 유동에 방해를 주는 밸브 면 및 스파크 플러그 등이 존재하므로 이의 간섭으로 와류 운동은 많이 소멸된 것으로 판단된다.

협각 엔진에서는, 실린더 상면에서 잘 전개되어 있는 강한 와류가 관찰된다. 다만 와류의 중심이 전측 배기 쪽에 위치하고 있기 때문에 후측 그리고 흡기 쪽의 유동이 매우 강하게 나타나고 있다. 이 결과도 앞서의 결과와 종합하여 판단해 보면, 협각 엔진

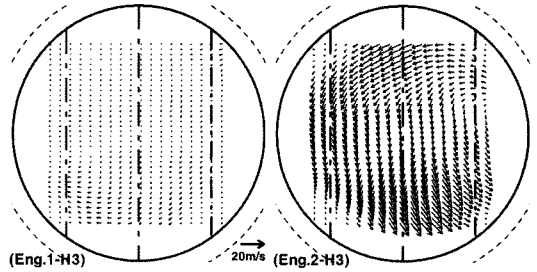


Fig. 10 Horizontal velocity field at ATDC 320° CA, (H1) : 7mm, (H2)

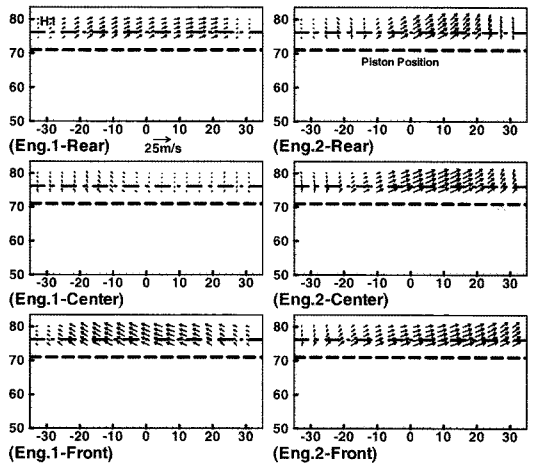


Fig. 11 Vertical velocity field at ATDC320° CA

에서는 흡입 말기부터 전체 실린더에 걸쳐 잘 정돈된 와류 거동이 존재한다. 이어 압축이 진행되어도 이 구조는 말기까지 계속 유지된다.

수직면 유동 분포에서도 협각 엔진의 경우 광각 엔진에 비해 강한 유동이 존재하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

PIV를 이용하여 광각 엔진과 협각 엔진의 실린더 내 와류 거동을 압축 행정 중에 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 압축 행정 초기에 광각 엔진의 경우 이전 시기에 비해 유동의 정돈이 흐트러지거나 현저히 약화되는 반면, 협각 엔진에서는 유동의 다소 약화되기는 하지만 전체적으로 형태를 보존하고 있다.
- 2) 압축이 진행되면서 협각 엔진은 흡기 행정 말의

유동 구조를 그대로 유지하고 있는 반면 광각 엔진은 실린더 하부에 강한 와류가 존재하는 구조가 된다.

- 3) 압축 말기 점화 직전 협각 엔진에는 실린더 상부에 잘 발달한 강한 와류가 존재하는 반면 광각 엔진에서는 미미하게 관찰되었다.

References

- 1) I. Y. Ohm and Y. S. Cho, "Mechanism of Axial Stratification and its Effect in an SI Engine," SAE2000-01-2843, 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 III-With High Swirl," Transactions of KSAE, Vol.9, No.3, pp.18-26, 2001.
- 3) 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.
- 4) I. Y. Ohm, C. J. Park and H. S. Kim, "In-Cylinder Intake Flow Characteristics of Helical Port Engines with Wide Valve Angle," Fall Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.138-146, 2006.
- 5) I. Y. Ohm, C. J. Park, H. S. Kim, "In-Cylinder Compression Flow Characteristics of Helical Port Engines with Wide Valve Angle," Fall Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.167-174, 2006.
- 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.
- 13) I. Y. Ohm and C. L. Myung, "In-Cylinder Flow Measurement Using PIV," Spring Conference Proceedings, KSAE, Vol.I, pp.80-87, 2002.
- 14) 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, 2005.