

정상유동 장치에서 CI 기관 유동의 특성(2) - 접선형 포트

소재한¹⁾ · 임인용²⁾

서울과학기술대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과²⁾

Flow Characteristics of CI Engine in Steady Flow Bench(2) - Tangential Port

Jaehan So¹⁾ · Inyong Ohm²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

²⁾Department of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

(Received 4 October 2024 / Revised 4 November 2024 / Accepted 11 November 2024)

Abstract : In this study, the flow characteristics of the tangential port of the CI engine are examined according to the geometrical arrangement and shape. For this purpose, the 9 ports were divided into 4 port types according to their geometric arrangement and shape. By observing the change in swirl as a function the valve lift according to the classified types, and analyzing the common characteristics of each type and the influence of shape changes applied to the port, the following results were obtained. The change in swirl due to lift is basically affected by the arrangement and macroscopic shape of the port, and the final swirl ratio is also determined by this arrangement and shape. Among the different types, the swirl ratio is highest when an reverse bend is adopted, since this shape and arrangement is suitable for inducing tangential flow along the cylinder wall.

Key words : Steady flow bench(정상유동장치), CI(압축점화), Swirl(스월), Impulse swirl meter(충격식 스월 측정기), PIV(입자영상유속계), Tangential port(접선형 포트)

1. 서론

내연기관의 내부유동은 기관의 성능과 효율에 지대한 영향을 주며, 이를 파악하기 위한 정상유동 평가는 현재 까지 내연기관의 유동 특성을 정의하는데 가장 유효한 방법이며 널리 사용되고 있다. SI(Spark Ignition, 불꽃점화) 기관에서, 유동특성을 지배하는 설계 변수로는 밸브 각도, 연소실 형상, 포트 형상이 있으며, 이들의 조합에 의해 유동 특성이 결정된다.¹⁻¹²⁾

한편 거의 절대 다수의 직분식 CI(Compression ignition 압축착화) 기관은 연소실이 피스톤 보울(Bowl)에 형성되고 밸브가 직립되어 있으며, 헤드 측의 연소실 형상이 평면으로 매우 단순하기 때문에 SI에서 고려되었던 밸브 각도와 연소실 형상의 영향을 배제할 수 있다. 따라서 포

트의 기하학적 배치와 형상만 실린더 유동에 영향을 주기 때문에 이 두 파라미터의 영향이 SI보다 지배적이며 명확히 드러난다.

소형 직분식의 경우, 유동과 분사장치의 특성이 성능에 지배적 영향을 미치므로, 기관 성능 개발에서 가장 중요한 요소는 유동과 분사 장치와의 적절한 조화인데, 일반적으로 분사 장치가 고도화될수록 유동의 역할은 줄어들어 든다.

한편 SI를 대상으로 한 이전 연구에서,¹⁻¹²⁾ 현재 통용되는 측정위치에서 ISM 측정의 문제점을 지적하였고, 측정 위치를 변경하며 PIV 결과와 비교함으로써 적절한 측정 위치의 선정을 정상 유동의 전개와 결부하여 논의하였다. 여기서 비교적 유동에 영향을 주는 변수가 SI보다 적지만, 유동에 대한 의존성이 SI보다 큰 CI에서도 이러

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

¹⁾This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

한 문제점이 내재되어 있는지 검증할 필요가 있다.

이러한 목적으로 이전 연구에서, 9개의 서로 다른 CI 포트의 정상유동 특성을 전체적으로 조망하여 SI 포트와 비교하여 분석하였다.¹³⁾

선행연구에서는, 포트 개방 방법 3가지와 측정위치 4곳에 대한 총 108개의 물리적 조합을 구성하고, 각각의 경우에 5가지 측정 및 평가 방법을 적용하여 총 540개의 결과를 취득하였다. 이를 SI 포트의 결과와 비교 평가하여 얻은 결론은 다음과 같다.

전체적으로 CI의 유동특성은 측정 위치 및 방법에 관계없이 SI 보다 변화가 적고 일관된 경향을 보여주며 동시에 두 포트를 동시 개방한 경우는 접선포트를 개방한 경우와 매우 유사하다.

총격식 스윙 측정기(ISM, Impulse Swirl Meter) 평가에서 CI 및 SI 모두 하류로 갈수록 스윙이 감소하지만, 나선형 포트를 사용한 경우 감소가 가장 크다. 이에 비해 PIV 평가에서는 하류로 갈수록 CI의 스윙은 감소하지만 SI는 연소실 형상에 따라 다른 특성을 지닌다.

아울러 PIV 평가에서는 축 방향 속도가 평면 속도에 비례한다고 가정할 경우 스윙이 가장 높게 평가되는데, CI에서는 이 값이 ISM 평가와 가장 가까운 반면 SI에서는 연소실과 포트 형상에 따라 달리 나타난다.

특히 CI에서 PIV 평가가 가장 높은 경우, 접선 포트 개방(TVO, Tangential Port Open)에서는 3.00B(헤드 하면에서 보어의 3.00배 하류)부터 ISM과 거의 일치하고 충전 포트 개방(FVO, Filling Port Open)은 ISM보다 항상 낮으며, 포트 동시 개방(BVO, Both Port Open)은 전 평면에 걸쳐 ISM과 잘 일치한다.

선행 연구에서도 언급했듯이 이러한 전체적 특성을 파악한 것과 별개로, 포트 설계에 대한 더 많은 정보를 얻기 위해서는 포트 형상과 역할 별로 구체적인 정상유동특성을 분석할 필요도 있다. 본 연구에서는 우선 접선 포트의 유동특성에 대해 논의하고자 한다. 이를 위해 9개의 접선 포트를 기하학적 배치 및 형상에 따라 분류하고 평가 방법과 위치에 따라 유동 특성을 분석하여, 형상에 따른 공통 특성을 도출하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1에 본 연구에 사용된 9개의 접선 포트 형상 사진을 제시하였다. 이전 연구¹⁾에서 포트를 제작사 별로 분류하여 제시하였는데, 본 연구에서는 포트를 기하학적 배치 및 형상에 따라 크게 3 종류로 분류하여 그룹화 하여 제시하였다. 나선형 포트는 주로 포트에서 형상에 의해 스윙 거동을 생성시키지만, 접선 포트는 형상보다 실린더와 포트의 배치에 의해 실린더 내에서 스윙 거동을

유도하는 생성기구가 더 중요하므로 배치를 기본으로 포트를 구분하였다. 다만 포트의 명칭은 이전 연구의 것을 그대로 제시하였고, 형상의 변화가 상면에서 보았을 때 잘 나타나지 않은 포트들은 측면의 형상도 함께 제시하였다.

Fig. 1에 제시된 포트 분류를 Fig. 2에 도식화하여 나타내었고 이를 설명하면 다음과 같다.

만곡(Bend) 형은 실린더 접선 방향을 따라 굽은 형태로 유동이 진입하는 경우이고, 직선(Straight)형은 포트 형상이 직선이고 동시에 흡배기 경계선을 따른 지름에 대해 수직 방향으로 배치된다. 역 만곡(Reverse bend)형은 포트 입구는 직선이지만 출구의 방향이 실린더 접선을 벗어나 벽면을 향하는 형상을 지닌다. 마지막으로 변형 역 만곡형(Deformed reverse bend)은 기본적으로 역 만곡형과 같지만, 출구와 가까운 밸브 스템 실(Stem seal) 부근 포트 형상에 변형이 생긴 것이다. 이 형상의 특징을

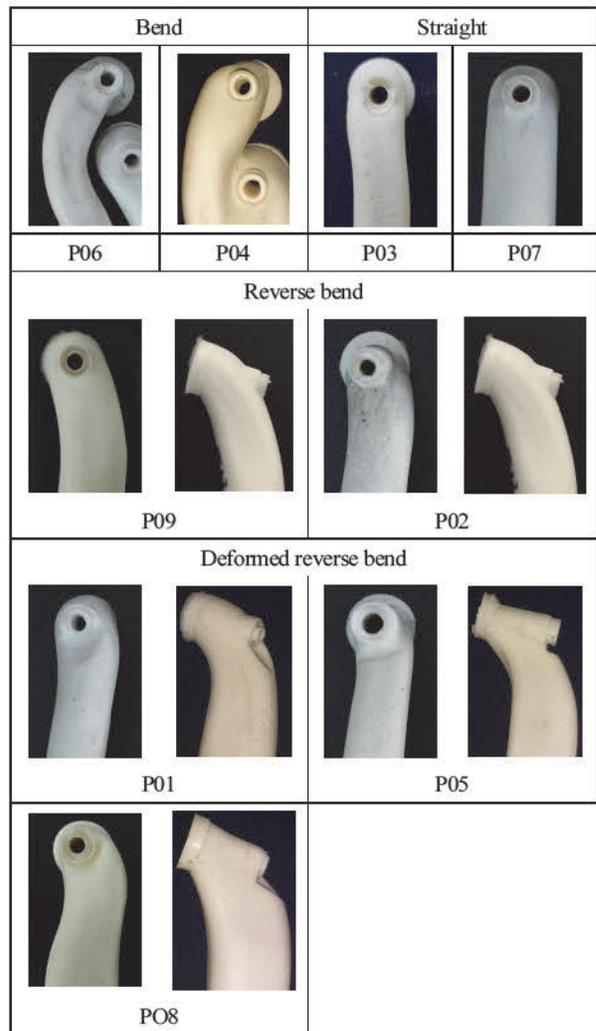


Fig. 1 Port shapes of 9 commercial ports by type

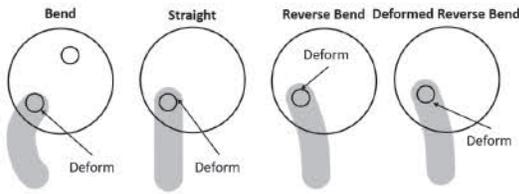


Fig. 2 Schematics of geometrical port arrange

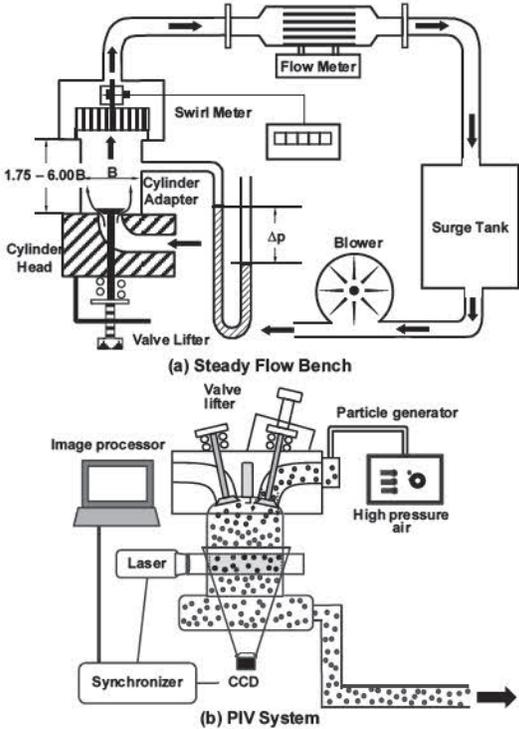


Fig. 3 Schematics of (a) steady flow bench and (b) PIV system

Fig. 2에 도식화하여 제시하였다.

실험장치의 개략도를 Fig. 3에 나타내었는데, SI 기관에서 밸브 각도를 달리하며 정상유동을 평가하여 유동 평가방법의 문제점과 개선 방향을 논의한 연구²⁻⁹⁾ 그리고 SI 기관에서 포트 형상과 연소실 형상이 유동특성에 미치는 영향을 다룬 연구들¹⁰⁻¹²⁾에서와 마찬가지로 ISM (G. Cusson사 P7300/200)과 PIV 측정은 통상적인 측정위치인 1.75B(헤드 하면에서 보어의 1.75배 하류)를 시작으로 3.00, 4.50, 6.00 B에서 실시하였다. 실험 조건과 기타 PIV 시스템의 사양은 Table 1에 나타내었는데 모든 시험조건은 ISM과 PIV 모두 동일하다. 자세한 장치의 설명과 실험방법은 본 연구의 선행 연구¹⁾ 및 SI 기관 대상 연구들^{2-6,10)}에서 다루었기 때문에 생략한다.

이전 연구에서 다룬 바와 같이 PIV의 경우 중심 설정과 축 방향 속도에 따라, 축 방향 속도가 일정하다고 가

Table 1 Experimental conditions and specifications of PIV

Laser pulse	Separation	25 μsec
	Frequency	5 Hz
	Width	≪100 μm
Sampling raw data no.		200
Pressure drop		15" H ₂ O(383 mm H ₂ O)
CCD camera		KODAK Megaplug ES 1.0
Lens		85 mm PC-E Micro Nikkor
Processing		50% overlap, 16 × 16 pixel
Atomizer		TSI SIX-JET 9306
Particle	Size	≪1 μm
	No. density	10 ⁷ particle/cm ³
	Stokes no.	≪1
Software		TSI Insight

Table 2 Momentum according to evaluation method

Method	Center	Axial velocity assumption
C _C	Cylinder	Constant ($v_{z,i} = v_z = Q/A$)
C _A		$v_{z,i} = v_z \cdot (v_i/\bar{v})$
V _C	Swirl	Constant
V _A		$v_{z,i} = v_z \cdot (v_i/\bar{v})$

정한 경우와 그렇지 않은 경우 그리고 스월의 중심을 실린더 중심과 같이 두는 경우와 실제 스월의 중심에 두는 경우를 조합하여 4가지 평가 방법이 존재한다. 이러한 경우를 Table 2에 간략히 제시하였다.

3. 포트 배치 및 형상에 따른 유동 특성

3.1 만곡(Bend)형

Figs. 4와 5에 만곡형 포트(포트 6, 4)의 유동 특성을 나타내었다. 그림에서 상단(a)에는 무차원 스월을 무차원 밸브 리프트에 대해 도시하였는데, 먼저 1.75B 위치에서 ISM과 PIV 평가 방법에 따른 변화를 도시하였다. 그 아래에는 ISM 결과와 비교하여, PIV 평가 중 결과가 가장 잘 일치하는 측정 평면의 결과를 도시하였다.

그림의 하단(b)에는 평가 위치에 따른 스월 비를 도시하였는데, 측정 위치에 따른 절대 값을 먼저 제시한 후 각 측정위치에서 ISM을 기준으로 할 때 PIV 평가의 상대적인 값을 도시하였다.

두 포트의 결과를 전체적으로 비교하면, 측정위치 및 방법에 따라 포트 6은 스월 비(R_s)가 1.5 ~ 2.3 사이이고 포트 4는 1.0 ~ 1.4의 값을 가지고 있어 포트 4의 스월 비가 낮게 나타난다. 이것은 Figs. 1, 2에서 알 수 있듯이 포

트 4 출구 부근 형상에서 우측이 공간적으로 제약되어 접선 방향 유동을 억제하는 것이 주요한 원인으로 판단되는데, 이러한 형상은 전체적으로 스윙 비를 낮추기 위한 의도적 설계로 판단된다. 이에 더해 포트 6의 곡률 반경이 더 작아 실린더 벽면을 추종하는 접선 방향 유동이 상대적으로 잘 발달하는 구조를 갖는 것도 이러한 스윙 비 차이의 원인 중 하나로 사료된다.

구체적으로 그림을 참조하며 두 포트 유동 특성의 공통점과 차이점을 분석하면 하면 다음과 같다.

먼저 리프트가 낮은 곳에서 두 포트 모두 ISM 평가가 매우 높게 나타난다. 이러한 현상은 상류인 1.75B에서

뚜렷이 나타나고, 이후 하류로 가면서 PIV 평가와 차이가 줄어든다. 이와 동시에 무차원 리프트 0.25 근방에서 ISM 평가가 낮아지는데, 포트 6의 경우 ISM 평가만 낮아지고, 포트 4의 경우 하류에서는 PIV 평가도 같이 낮아지는 차이가 있다. 이에 더해 PIV 평가에서 대부분의 경우 중심 설정보다는 축 방향 속도의 영향을 더 크게 받는데, 실린더 중심의 경우 축 방향 속도의 영향이 뚜렷이 나타나지 않는다.

PIV 평가에서 리프트에 따른 무차원 스윙은, 포트 6은 리프트 증가에 따라 꾸준히 증가하지만 포트 4의 경우 낮은 리프트에서 일정 수준에 도달한 후 그 수준을 계속

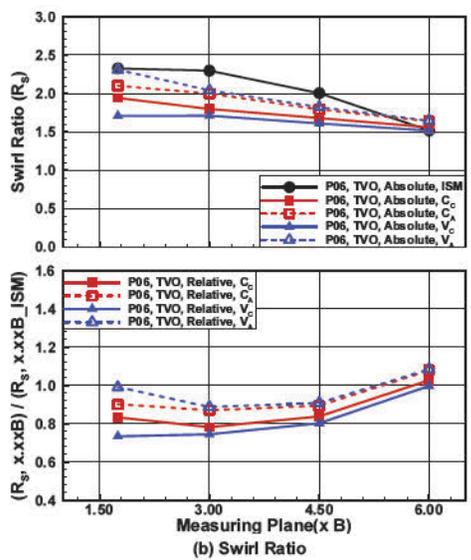
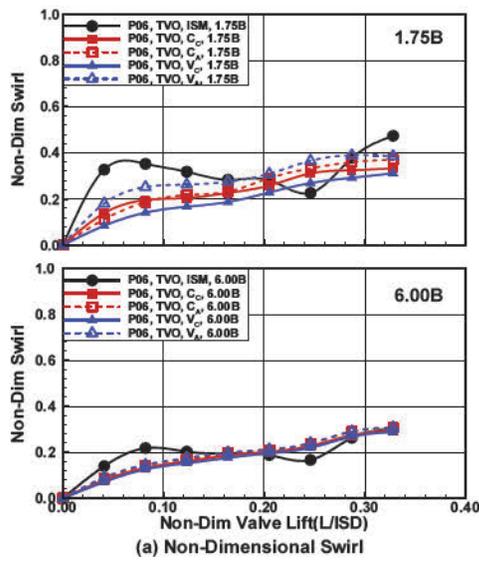


Fig. 4 (a) Non-dimensional swirl as a function of non-dimensional valve lift and (b) swirl ratio as a function of estimating plane of bend type (port 6)

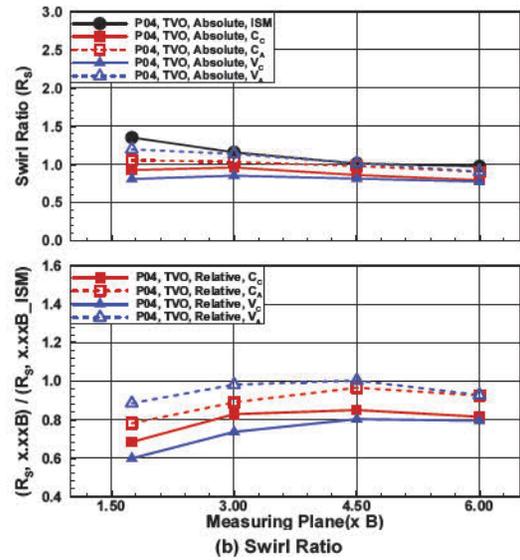
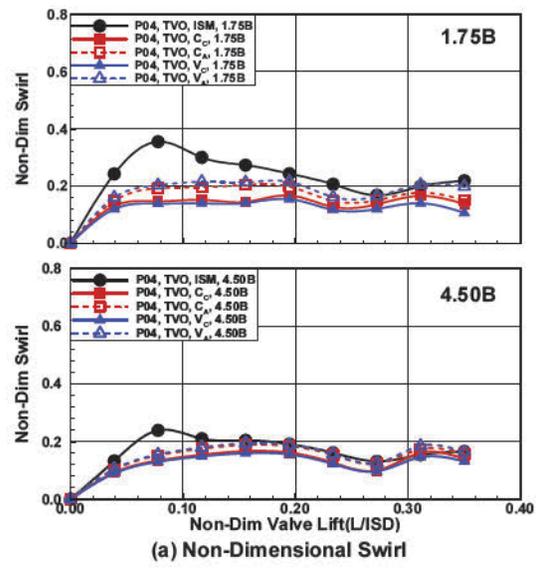


Fig. 5 (a) Non-dimensional swirl as a function of non-dimensional valve lift and (b) swirl ratio as a function of estimating plane of bend type (port 4)

유지하고 있다. 포트 4가 이러한 특성을 지닌 이유는, Figs. 1, 2의 포트 형상과 변형에 나타나 있듯이 밸브 가이드 우측 유로가 제한되어 있기 때문에 실린더 벽면을 따라 흐르는 접선 방향 유동이 크게 발달하지 못한 것으로 판단된다. 이 차이가 두 포트의 최종 스윙 비 차이를 결정하여 포트 4의 스윙 비가 낮게 나타난다.

여기서 만곡형 포트를 포함해 이후 논의 예정인 여러 포트에서, 리프트에 따른 스윙의 변화는 단조롭게 상승하지 않고 상승에 따라 감소하기도 하며 동시에 복잡한 형태를 지니는 것에 대해 논의해 보면 다음과 같다.

내연기관은 크랭크 기구에 의한 피스톤의 위치 변화와 밸브의 개폐 등에 의해 모든 과정이 비정상 상태로 운전된다. 이러한 특성에 의해 흡입 과정도 밸브 리프트에 따라 포트 출구에서 유동현상 및 실제 출구 형상 및 유로 등에 변화가 있어, 정상유동이라도 리프트에 따라 이를 몇 개로 구분하여 특성을 논의한다.¹⁴⁾ 이러한 변화로 리프트에 따라 실린더로 진입하는 유동의 방향과 속도에 큰 변화가 발생한다. 리프트가 낮은 경우 상대적으로 반경 방향의 유동이 강하게 그리고 리프트가 큰 경우 축 방향 유동이 강하게 형성된다. 또한 실린더로 진입한 이후에도 유동들의 상호 작용에 의해 실린더 내에서도 많은 변화를 겪으므로, 리프트 변화에 따른 스윙의 변화는 단조롭게 상승하지 않고 형태의 변화가 있으며 최고 리프트 근방에서도 감소하는 현상이 발생한다.

평가 위치에 따른 스윙 비는 두 포트에서 모두 상류에서는 방법 간의 차이가 크게 나타나고 ISM 평가 값이 가장 크지만, 하류로 가면서 방법 간의 차이가 지속적으로 감소하는 공통점이 있지만 위치에 따른 변화의 경향은 서로 상이하게 나타난다.

포트 6의 경우, 위치 6.00B에 도달하면 모든 방법 간 평가에 거의 차이가 없는 반면, 포트 4의 경우 4.50B에서 방법 간 차이가 최소가 되고 6.00B까지 이 수준이 유지된다.

ISM과 PIV의 상대 값은 포트 6의 경우 3.00B에서 PIV 평가가 최소가 되고 증가하지만, 포트 4의 경우 3.00B부터 증가하고 4.50B에서 최고가 된 후 6.00B에서 약간 하락한다는 차이가 있다.

3.2 직선(Straight)형

Figs. 6과 7에는 직선형 포트의 결과를 나타내었다. 먼저 스윙 비의 경우 포트 3은 1.4~1.9 그리고 포트 7은 0.8~1.2 사이에 분포하여 대체로 만곡형 보다 낮다.

두 포트의 공통점을 보면, 두 포트 모두 리프트에 따른 스윙의 전체적인 변화에서 중간 리프트에서 최솟값을 보인 후 리프트 증가에 따라 감소한다.

두 포트의 차이점은, 먼저 포트 7은 중간 리프트에서 스윙이 최고가 된 후 리프트 증가에 따라 감소하여 최고 리프트에서 거의 0에 수렴하고 있는데, 이 특징에 의해 전체적으로 스윙 비가 낮게 나타난다.

ISM과 PIV를 보면, 포트 3은 1.75B에서 ISM이 PIV 평가보다 높고 낮은 리프트에서 변화 형태에 차이가 있지만 6.00B에서 방법 간 차이는 거의 없다. 반면 포트 7의 경우 1.75B에서 ISM 그리고 PIV 평가에서는 축 방향 속도 가정에 따라 차이가 크고, 4.50B에서 이 차이는 많이 줄어들지만, 여전히 포트 3에 비해서 큼을 알 수 있다. 동시에 포트 3은 리프트에 따른 변화의 형태가 완만한 반

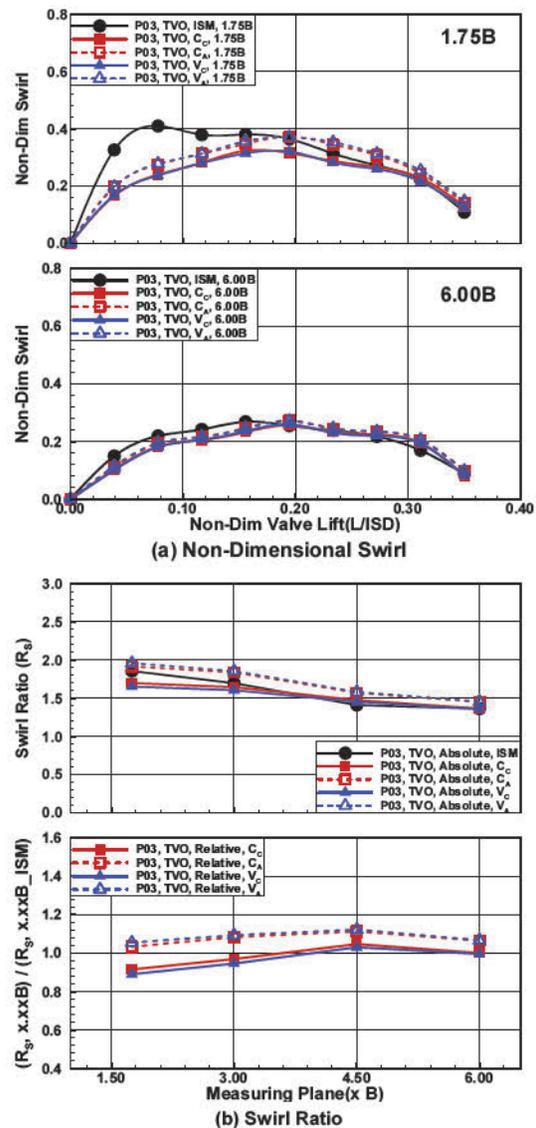


Fig. 6 (a) Non-dimensional swirl as a function of non-dimensional valve lift and (b) swirl ratio as a function of estimating plane of straight type (port 3)

면 포트 7의 경우 상대적으로 변화의 형태가 복잡하다.

거시적 변화 형태는 유사하지만 세부적인 변화에서 차이가 발생하는 것은 두 포트의 형상 차이에 기인한 것으로 판단된다. Fig. 1에서 그리고 Fig. 2에 도시되어 있듯이 포트 3의 경우 출구 근처의 오른쪽 유로가 제한된 형상을 가지고 있다. 이 형상은 실린더 중심 쪽으로 유입되는 유동을 제한하여, 실린더 벽 방향으로 유입되어 접선을 따르는 유동을 상대적으로 증가시킨다. 이에 따라 포트 3이 접선 방향 유동이 강화되어 스월이 증가하고, 중심 방향으로 유입되는 유동과의 상호 간섭은 감소되어 비교적 완만한 형태로 변화하는 것으로 판단된다. 이

러한 형상설계는 스월 비를 늘이기 위한 의도가 반영되었다 판단된다.

평가 위치에 따른 스월 비의 상대적 변화에서 포트 7은 ISM과 PIV의 상대적 차이가 크고 항상 ISM 평가가 높아서 PIV 평가는 ISM 평가의 45 ~ 95 % 정도이다.

3.3 역 만곡(Reverse bend)형

Figs. 8과 9에는 역 만곡형인 포트 9와 포트 2의 결과를 제시하였다.

이 두 포트는 Fig. 1에 도시된 바와 같이 상면에서 보면 유사한 형상이지만, 측면에서 보면 상당한 차이점이 있다. 즉 포트 2의 경우 실린더로 진입하는 주 유동이 형성되는 포트의 말단부의 유로의 경계가 밸브 스텝에 근접하고 따라서 이 부분으로 진입하는 유동이 상당히 제한되는 형상이다. 이 역시 스월 비 조정을 위한 의도된 형상으로 판단된다.

이러한 형상 차이에도 두 포트는 다음과 같은 공통적 특성을 보여준다. 먼저 스월 비가 각각 1.5 ~ 2.9 그리고 1.6 ~ 2.7 사이에 분포하여, 배치 및 형상에 따라 분류한 포트들 중에 가장 큰 값을 가지고 있다. 그리고 리프트에 따른 무차원 스월의 경우 최고 리프트에서 가장 높는데, 이에 따라 높은 스월 비를 가지게 된다.

이렇듯 역 만곡형 포트의 높은 스월은 기본적으로 포트의 배치에 의한 것으로 판단되는데, 전체적으로 이러한 배치에 의해 실린더 벽면을 추종하는 접선 유동을 더 강하게 유도한다고 사료된다.

구체적으로 살펴보면, 포트에서 실린더로 유동이 진입할 때 속도 분포는 균일하지 않아, 주로 포트 상면 및 중심선을 따른 유동이 가장 빠르며 실린더 벽면에 근접한 곳에서는 벽면에 의한 제약으로 유속이 높지 않다. 동시에 실린더 벽을 따르는 접선 방향 유동은 포트의 반대쪽 벽면에서 주로 형성된다.^{4,5,10,11,15-20)}

이러한 상황을 고려하면 만곡형의 경우 진입하는 주 유동이 벽면보다는 실린더 중심 쪽에 더 집중되고, 직선형 역시 포트 출구와 건너편 벽면까지 거리가 멀어 실린더 중심 쪽을 향하는 유동의 비율이 상당하다. 역 만곡형은 상기 포트들에 비해 주 유동 진입 위치와 벽면과의 거리가 가장 짧고 이 유동이 벽면을 잘 추종하는 배치를 가지고 있어 높은 스월이 형성된 것으로 판단된다.

두 포트의 또 다른 공통점은 평가 위치 및 방법에 따라, ISM 평가는 1.75B에서 매우 높고 이후 하류로 갈수록 크게 감소한다. PIV 평가는 축 방향 속도 가정에 따라 달리 나타나는데, 축 방향 속도를 고려하면 1.75B와 3.00B에서 거의 같고 이후 감소하고, 축 방향 속도를 고려하지 않으면 3.00B에서 가장 높고 이후 감소한다. ISM

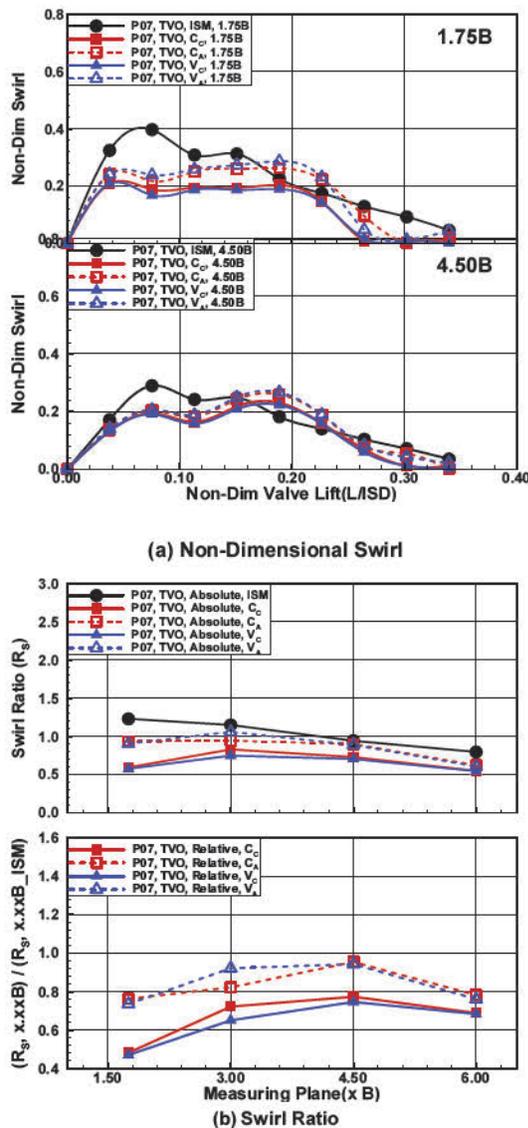


Fig. 7 (a) Non-dimensional swirl as a function of non-dimensional valve lift and (b) swirl ratio as a function of estimating plane of straight type (port 7)

과 PIV의 상대적 스윙 비는 모든 평면에서 ISM 평가가 높으며 1.75B에서 그 차이가 가장 크고 4.50B에서 가장 적다.

두 포트의 차이점은 리프트에 따른 스윙의 변화에서 다음과 같이 나타난다.

먼저 포트 9는 상류에서 ISM과 PIV의 차이가 크고 하류로 진행하여도 어느 정도 접근하지만 잘 일치하지는 않는다. 더불어 ISM 평가에서는 중간 리프트에서 스윙이 감소하여 두 개의 정점이 나타는데, PIV에서는 이러한 경향이 뚜렷하지 않고 낮은 리프트에서 스윙이 상승한 후 일정 수준을 유지하다 높은 리프트에서 증가한다.

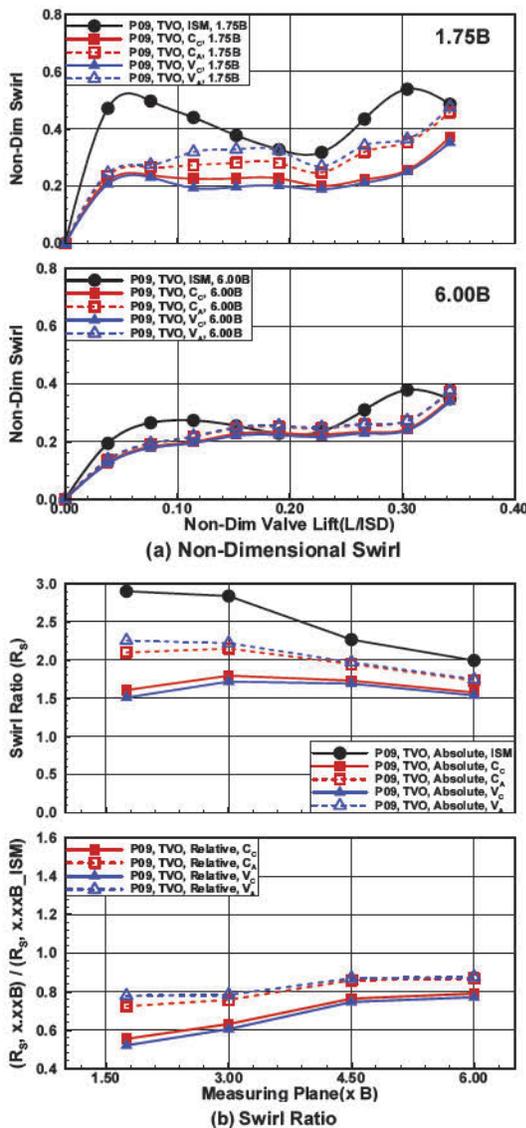


Fig. 8 (a) Non-dimensional swirl as a function of non-dimensional valve lift and (b) swirl ratio as a function of estimating plane of reverse bend type (port 9)

이에 비해 포트 2는 ISM과 PIV 평가에 따른 차이가 상류에서 발생하지만 크지 않고, 4.50B에서는 거의 일치하고 있다. 동시에 리프트가 낮을 때 리프트 증가에 따른 스윙의 증가가 크지 않지만 중간 리프트를 넘어서면서 급격히 증가하여 최고 리프트에서 높은 값을 가진다. 낮은 리프트에서 스윙이 높지 않은 것은 포트의 상면을 흐르는 주 유동이 형상의 제약을 받아 강하게 형성되지 않기 때문이고, 이후 리프트가 증가하면 이 부분의 유도가 확대되어 주 유동이 이를 통해 흐르기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 상기한 이전 연구에서,¹⁾ SI 기관에서 반 췌기 형

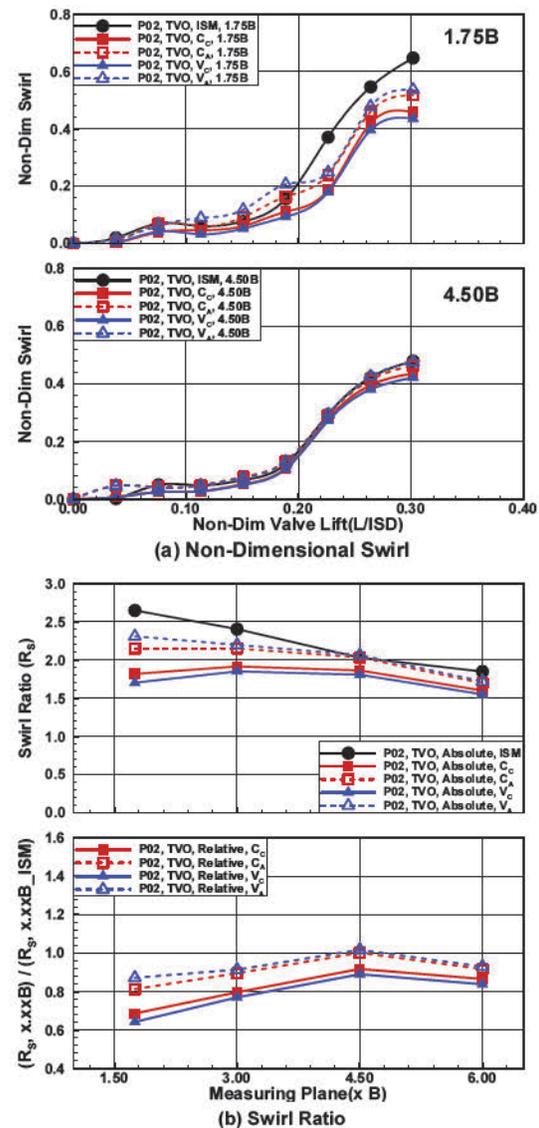


Fig. 9 (a) Non-dimensional swirl as a function of non-dimensional valve lift and (b) swirl ratio as a function of estimating plane of reverse bend type (port 2)

연소실을 채택하면 스월의 변화가 CI와 유사함을 논의하였는데, 이에 더해 포트의 배치는 역 만곡형과 유사하며 이에 따라 스월의 변화 특성도 상당한 공통점을 가지고 있다. 이를 논의하기 위해 반 쉐기 형 연소실을 채택한 SI 기관에서 직선형 포트의 특성을 Fig. 10에 제시하였다.

CI의 역 만곡형이 SI의 직선형과 배치가 유사한 이유는, SI의 경우 헤드측 포트 입구에서 포트의 유로가 통합되어 있다가 격벽(Dividing wall)을 설치하여 두 포트가 “Y”자 형태로 갈라지는 반면, 대부분의 CI는 헤드측 포트 입구에서부터 두 포트가 별도의 유로를 형성한다. 따

라서 출구 부분에서 CI가 역 만곡형인 경우 SI와 유사한 배치가 된다.

Fig. 10에서 알 수 있듯이, 리프트에 따른 무차원 스월의 변화는 포트 9와 매우 유사함을 알 수 있다. 또한 측정 평면, 평가 방법에 따른 변화도 유사하다.

포트2와 SI 포트의 차이는, 무차원 스월의 변화에서 포트2는 전체 평면에 걸쳐 ISM과 PIV 평가의 차이가 크지 않고 하류에 가면 잘 일치한다. 반면, SI 포트는 1.75B 상류에서 변화의 형태만 유사하고 절댓값에 큰 차이가 있고 하류(6.00B)에서도 낮은 리프트에서 차이가 있다는 것이다. 이는 전체적으로 SI의 경우 실린더 내 유동에 영향을 주는 밸브 각, 포트 각 및 연소실 형상에 관련한 흡기계 구성의 파라미터가 다수 존재하지만, CI에서는 상호 작용을 하며 유동의 특성에 영향을 주는 이러한 파라미터가 배제되어 단순하므로 보다 정돈된 유동이 존재하기 때문인 것으로 판단된다.

이에 더해 형상이 비교적 단순한 포트 9는 포트 2 및 SI 포트와 조금 다른 무차원 스월 변화 형태를 나타내는데, 이는 실린더로 진입하는 배치의 차이 즉 진입 각도에 따른 차이로 판단된다.

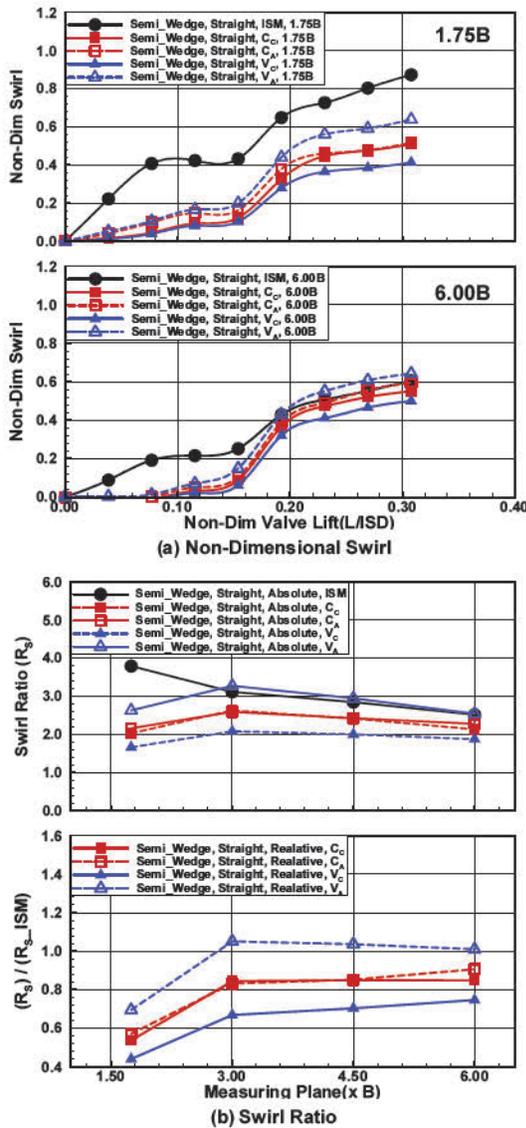


Fig. 10 (a) Non-dimensional swirl as a function of non-dimensional valve lift and (b) swirl ratio as a function of estimating plane of straight port of SI semi-wedge

3.4 변형 역 만곡형(Deformed reverse bend)

Figs. 11 ~ 13에 변형 역 만곡형 포트의 유동 특성을 제시하였다.

이 포트들은 각각 스월 비가 포트 1은 0.7~1.3, 포트 5는 0.7~1.1 그리고 포트 8은 1.0~1.5 사이에 존재하여 분류한 포트 종류 중 비교적 낮은 범위의 스월 비를 가지고 있다. 이것은 스템 실 부근에 가한 변형이 모두 포트 상면을 따라 흐르는 주 유동을 제한하는 역할을 하므로 접선 방향 유동이 잘 발달하지 못한 것이 원인이라고 판단된다.

이 접선포트들의 형상을 동일 포트를 구성하는 충전형의 스템 실 부근 형상과 비교해 보면, 포트 1과 5는 의도적 변형이고 포트 8은 유동을 고려한 것 보다 다른 설계 제약에 의한 것으로 판단된다. 동시에 Fig. 1에서 관찰되듯이 포트 8은 포트의 좌측도 상당히 작은 곡률로 급격히 유로가 굽어지는 형태를 가지는데, 이 역시 유동적 관점보다 설계의 제약에 의한 것으로 판단된다.

전체적으로 리프트에 따른 스월의 변화는 포트 1과 5가 유사하고 포트 8은 전혀 다른 특성을 보여준데, 포트 8의 이러한 특성은 앞서 언급한 유동 측면이 아닌 다른 제약 조건에 의한 형상 변화에 기인한다고 판단된다. 이 포트들도 기본적 배치는 역 만곡형이므로 앞에서 살펴본 결과들과 결부하여 논의하면 다음과 같다.

리프트에 따른 스월 변화에서, 포트 1과 5는 모두 중간

리프트까지 스월이 낮고 높은 리프트에서 증가한다. 두 포트의 차이는 포트 1은 리프트가 증가하여도 초기에는 거의 스월이 생성되지 않다가 이후 증가하여 일정 수준을 유지한다.

반면에 포트 5에서는 지금까지 관찰되지 않은 변화 형태가 관찰된다. 즉 낮은 리프트에서 반대 방향의 스월이 생성되다가 이후 리프트가 증가하면서 다시 방향이 바뀐 후 최고 리프트까지 꾸준히 증가한다.

두 포트의 이러한 변화는 기본적으로 높은 리프트에서 높은 스월을 나타내는 역 만곡형 배치의 특성으로 판

단되며, 다른 변화는 스템 실 부근의 변형을 포함해 포트 출구에 가해진 변형에 의한 것으로 판단된다. 이를 자세히 논의하면 다음과 같다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 포트 1은 스템 실 주변만 변형되어 있다. 여기서 변형 부위의 우측이 좌측 부위보다 높아 나선형 포트의 램프(Ramp) 형상과 유사하다. 이 영향으로 포트에서는 실린더 내 스월 방향과는 반대 방향의 유동을 유도한다. 포트 생성 유동의 방향과 실린더 벽과의 상호 작용으로 생성되는 접선 방향 유동이 서로 다르므로 낮은 리프트에서는 스월이 낮게 나타난다. 이후 리

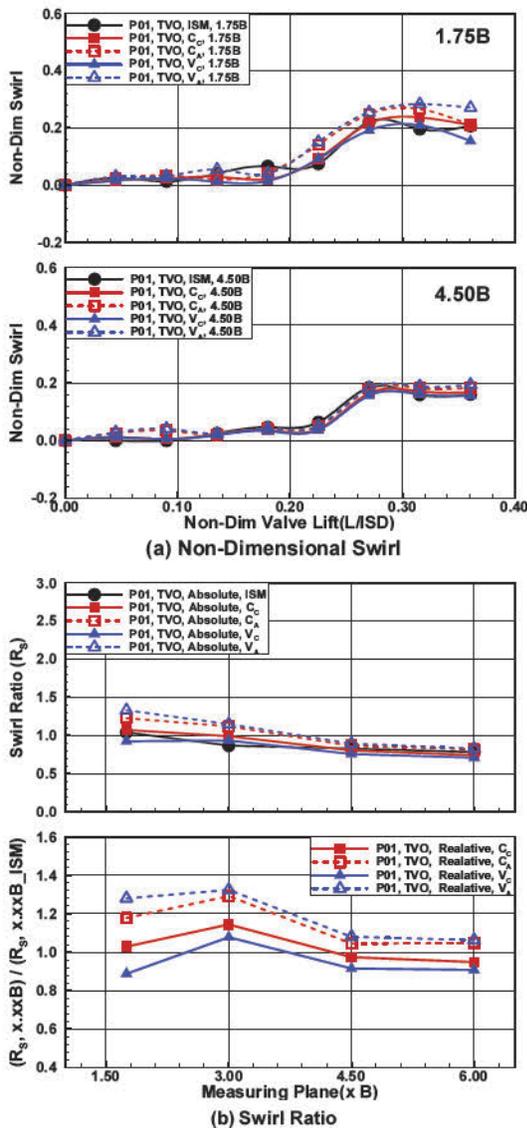


Fig. 11 (a) Non-dimensional swirl as a function of non-dimensional valve lift and (b) swirl ratio as a function of estimating plane of reverse bend with restriction type (port 1)

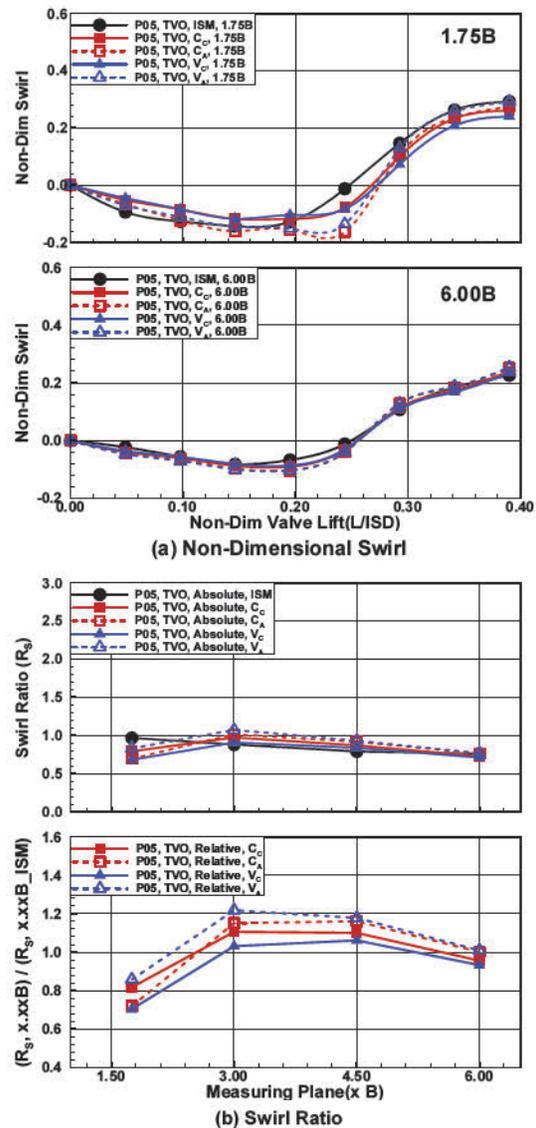


Fig. 12 (a) Non-dimensional swirl as a function of non-dimensional valve lift and (b) swirl ratio as a function of estimating plane of reverse bend with restriction type (port 5)

포트가 높아짐에 따라 주 유동이 강화되며 실린더로 진입하는 유동의 방향에도 변화가 생겨 포트 내 생성 유동의 영향이 상대적으로 감소하여 높은 리프트에서 스윙 증가하는 것으로 판단된다.

포트 5는 스텝 실 주변 변형에 더해 다른 변형이 존재하는데, 밸브 스텝을 기준으로 포트 출구 우측의 유로는 확대되고 좌측 유로 축소는 축소되어 있다. 이러한 형상은 포트 1과 같이 포트 출구 내에서 접선방향 유동과 반대 방향의 스윙을 유도한다. 그리고 또 다른 변형은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 포트 2와 같이 실린더로 진입하는

주 유동이 형성되는 포트의 말단부가 축소되어 유동을 제한하는 형태이다.

이러한 형상 변경에 의해 낮은 리프트에서는 포트 1처럼 역 방향 스윙이 형성되고, 리프트가 높아지면 역 만곡형인 포트 2처럼 스윙이 크게 증가한다.

포트 1과 포트 5는 본 연구에서 다루는 포트 중에서 ISM 평가와 PIV 평가가 가장 잘 일치하고 있는데, 1.75B에서 약간의 차이만 있고, 하류에서는 거의 완벽하게 일치함을 알 수 있다.

포트 8은 앞서 언급한 작은 곡률로 급격히 굽은 부위와 스텝 실 부분의 변형 외에 다른 변형은 없다.

우선 포트 8은 리프트에 따른 스윙의 변화가 다른 역 만곡형과는 달리 직선형 포트와 유사한 형태를 보여준다. 그리고 전체 평면에 걸쳐 ISM 평가가 높고 동시에 하류로 이동하여도 ISM 평가와 PIV 평가는 잘 일치하지 않는다. 이러한 차이의 원인에 대해 논의하면 다음과 같다.

먼저 포트 8은 실린더 벽을 따르는 접선 유동을 유도하는 것이 다른 역 만곡형에 비해 불리한데, 그 이유는 실린더 벽과 포트가 이루는 각이 상당히 커서 벽과 충돌하는 성분이 증가하여 벽을 따라 흐르는 접선 유동 성분이 상대적으로 감소한다. 그리고 벽에 충돌하는 유동 성분이 증가함에 따라 실린더 내 유동은 매우 복잡한 형태로 진행되고, 이러한 복잡한 유동은 ISM 평가를 왜곡시켜 PIV 평가와 큰 차이를 유발한다.^{4,5,10,11} 동시에 약화된 접선 방향 유동으로 PIV 평가는 중간 리프트까지 크게 증가하지 않는다.

이후 리프트가 높은 곳에서는 스윙이 감소하는데 이는 스텝 실 부근의 변형으로 인해 포트 상부를 통과하는 주 유동이 제약된 결과로 판단된다.

앞서 언급한 바와 같이 포트 8의 변형은 의도적이지 않고 각종 제약에 의한 설계 결과로 판단되는데, 판단의 근거는 다음과 같다.

이전 연구에서 전체적인 스윙 비는 접선 포트가 지배하고 나선 포트는 일종의 보조 역할을 하며, 이에 따라 두 포트 동시 개방의 경우(BVO, both valve open)와 접선 포트 개방(TVO, tangential port open)의 경우가 상당히 근접한 값을 나타내었다.¹⁾ 포트 8의 접선형은 높지 않은 스윙 비를 가지는데, 이에 비해 충전형은 가파른 경사(Steep ramp)의 나선 구조로 높은 스윙을 유도하여 스윙 비가 1.7 ~ 3.0 정도의 범위에 있고 두 포트를 동시 개방한 경우 접선형 보다 높은 1.1 ~ 1.7 정도의 값을 가진다. 이렇게 나선 포트로 BVO의 스윙 비를 높이는 경우는 9개의 대상 포트 중 2개에 불과하며 그 중 하나가 포트 8이다. 따라서 접선 포트가 설계 제약에 의해 스윙 비가 생성이 낮으므로 이를 보충하기 위해 충전 포트의 스윙

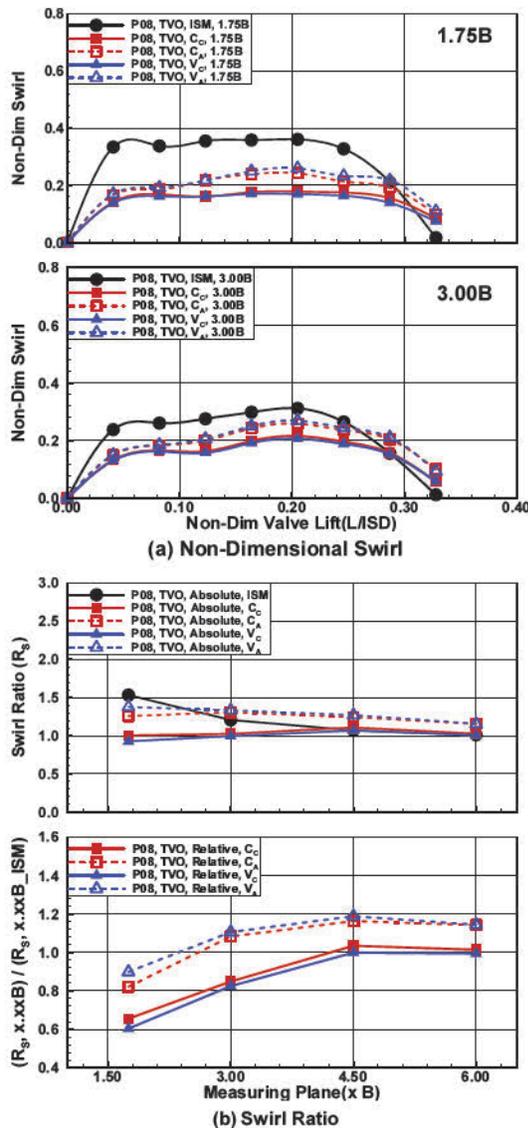


Fig. 13 (a) Non-dimensional swirl as a function of non-dimensional valve lift and (b) swirl ratio as a function of estimating plane of reverse bend with restriction type (port 8)

을 높인 것으로 판단된다.

평가위치에 따른 상대적인 스윙 비의 변화를 보면 대체로 ISM과 PIV 평가 값 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 동시에 여러 형태의 포트 중에서 PIV 평가가 가장 높아 ISM 보다 큰 경우가 많은데, 포트 1의 경우 1.75B에서도 PIV 평가가 더 높은 경우도 있다.

이상 포트 배치 및 형상에 따른 접선 포트의 유동 특성에 대해 논의하였는데, 물론 미세 유동 조정을 위한 오프셋 챔퍼(Offset chamfer)가 모든 포트에 적용되어 있어 유동 특성에 영향을 주고 있다. 그러나 챔퍼 각도 및 위치의 적용 방법은 사실상 제한이 없어 이를 모두 논의하는 것은 불가능하다. 그리고 최종 스윙 비에 영향을 주지만 스윙의 변화 형태에는 크게 영향을 주지 않는다.²¹⁾ 따라서 본 연구에서는 이 영향을 고려하지 않고 거시적인 포트의 기하학적 배치와 형상에만 논의를 국한하였다.

서론에서 언급한 바와 같이 CI 기관의 성능 개발에는 유동과 분사계의 적절한 조합이 매우 중요하며, 분사계의 특성에 따라 요구되는 유동특성은 달라진다. 동시에 포트 설계에는 여러 통로 및 부품과의 간접 문제가 발생하여 적절한 유동 특성을 구현하는데 제약 요소로 작용한다. 따라서 목표로 하는 유동특성을 구현하기 위해서는, 이의 실현에 가장 적합한 또는 차선의 포트 배치와 형상을 개념 설계 단계에서 고려하여야 하며, 본 연구의 결과가 이 부분에 기여되기를 바란다.

4. 결론

CI 기관 접선포트의 유동 특성을 고찰하기 위해 9개 포트를 기하학적 배치 및 형상에 따라 4가지 포트 유형으로 구분하였다. 구분된 유형에 따라 리프트에 따른 스윙의 변화를 관찰을 통해, 유형 별 공통점과 포트에 가해진 형상 변화의 영향을 분석한 후 다음과 같은 결과를 얻었다

- 1) 리프트에 따른 스윙의 변화는 기본적으로 포트의 배치와 거시적 형태에 영향을 받고, 이에 따라 최종 스윙 비도 결정된다.
- 2) 스윙 비는 역 만곡형을 채택하는 경우 가장 높는데, 이는 이러한 형상과 배치가 실린더 벽을 따르는 접선 유동을 잘 유도하기 때문이다.
- 3) 직선형을 채택하는 경우 최고 리프트에서 스윙이 감소하여 최종 스윙 비는 가장 낮다.
- 4) 변형 역 만곡형은 대부분 접선 유동을 억제하여 스윙 비를 낮추는 출구 형상을 가지고 있다.
- 5) 포트 출구 부위의 형상은 대부분 최고 리프트 근방에서 스윙을 조정하기 위해 사용되는데, 역 만곡형의 경우 낮은 리프트에서 스윙을 조절하기도 한다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었다.

References

- 1) C. Park and I. Ohm, "Study on Evaluation Method of Flow Characteristics in Steady Flow Bench(1)-Raising Issue," Transactions of KSAE, Vol.23, No.1, pp.88-96, 2015.
- 2) C. Park and I. Ohm, "Study on Evaluation Method of Flow Characteristics in Steady Flow Bench(2)-Comparison of ISM and PIV Measurement," Transactions of KSAE, Vol.23, No.1, pp.139-147, 2015.
- 3) C. Park, J. Sung and I. Ohm, "Study on Evaluation Method of Flow Characteristics in Steady Flow Bench(3)-Velocity Profile(1)," Transactions of KSAE, Vol.24, No.2, pp.169-182, 2016.
- 4) C. Park, J. Sung and I. Ohm, "Study on Evaluation Method of Flow Characteristics in Steady Flow Bench(4)-Velocity Profile(2)," Transactions of KSAE, Vol.24, No.2, pp.242-254, 2016.
- 5) S. Cho and I. Ohm, "Study on Evaluation Method of Flow Characteristics in Steady Flow Bench(5)-Effect of Evaluation Position," Transactions of KSAE, Vol.25, No.2, pp.179-189, 2017.
- 6) C. Yang and I. Ohm, "Study on Evaluation Method of Flow Characteristics in Steady Flow Bench(6)-Effect of Axial Velocity," Transactions of KSAE, Vol.26, No.2, pp.174-186, 2018.
- 7) C. -H. Lim, J. -H. Hyun and I. Ohm, "Study on Evaluation Method of Flow Characteristics in Steady Flow Bench(7)-Torque Distribution along Radial Direction(1)," Transactions of KSAE, Vol.28, No.1, pp.75-86, 2020.
- 8) C. -H. Lim, J. -H. Hyun and I. Ohm, "Study on Evaluation Method of Flow Characteristics in Steady Flow Bench(8)-Torque Distribution along Radial Direction(2)," Transactions of KSAE, Vol.31, No.1, pp.29-42, 2023.
- 9) H. Kim and I. Ohm, "Effects of Port Shape on Steady Flow Characteristics in an SI Engine with Semi-Wedge Combustion Chamber(1)-Velocity Distribution(1)," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol.40, No.7, pp.417-427, 2016.
- 10) I. Yoon and I. Ohm, "Effects of Port Shape on Steady Flow Characteristics in an SI Engine with Semi-Wedge Combustion Chamber(2)-Velocity

- Distribution(2),” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol.41, No.2, pp.97-107, 2017.
- 11) J. Hyun and I. Ohm, “Effects of Port Shape on Steady Flow Characteristics in an SI Engine with Semi-Wedge Combustion Chamber(3)-Comparison of Evaluation Method and Position,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol.42, No.10, pp.631-643, 2018.
 - 12) W. -T. Kim and I. Ohm, “Effects of Port Shape on Steady Flow Characteristics in an SI Engine with Semi-Wedge Combustion Chamber(4)-Distribution Characteristics along the Radial Direction,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol.46, No.8, pp.427-439, 2022.
 - 13) Y. Park and I. Ohm, “Flow Characteristics of CI Engine in Steady Flow Bench(1)-Comparison with SI Port,” Transactions of KSAE, Vol.32, No.1, pp.59-68, 2024.
 - 14) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, Int. edn., McGraw-Hill, pp.226-230, Singapore, 1988.
 - 15) I. Ohm and C. Park, “In-Cylinder Intake Flow Characteristics according to Inlet Valve Angle,” Transactions of KSAE, Vol.14, No.3, pp.142-149, 2006.
 - 16) I. -Y. Ohm and M. Kim, “The Effect of Intake Valve Angle on In-Cylinder Flow During Intake and Compression Process,” SAE 2007-01-4045, 2007.
 - 17) I. Ohm and C. Park, “In-Cylinder Intake Flow Characteristics of Helical Port Engines with Wide Valve Angle,” Transactions of KSME, Vol.32, No.10, pp.761-768, 2008.
 - 18) I. Ohm and C. Park, “Effect of Inlet Valve Angle on In-Cylinder Swirl Generation Characteristics(I),” Transactions of KSAE, Vol.16, No.6, pp.148-156, 2008.
 - 19) S. Kim and I. Y. Ohm, “Measurement and Evaluation of Tumble Flow of SI Engine Using Stereo PIV in a Steady Flow Bench(1)-Experimental System and Calibration,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol.48, No.8, pp.549-559, 2024.
 - 20) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, Int. edn., McGraw-Hill, pp.348-349, Singapore, 1988.
 - 21) K. Lee, S. Baik and I. Ohm, “Numerical Study for Effect of Offset Chamfer on Steady Flow Characteristics in a CI Engine Intake Port,” 1999 KSAE Spring Conference Proceedings, pp.55-60, 2019.