

포트 마스크링이 엔진의 부분부하 성능에 미치는 영향: Part I - 희박연소 한계

Effects of Port Masking on Part Load Performance: Part I - Lean Misfire Limit

이 원 근*, 엄 인 용**
Wongyun. Lee, Inyong. Ohm

ABSTRACT

This paper is the first of companion papers, which investigate port-masking effects on lean misfire limit. Port-masking was applied to commercial SOHC 3-valve and DOHC 4-valve engine by inserting masking plates between manifold and port. To induce various conditions of stratification, six types of masking plates were applied. The masking plates were placed in the upstream of injector to prevent wall wetting and two ports were not separated to permit both fuel and air entering through masked port. The results were compared with those by conventional port throttling.

The results show that lean misfire limit mainly depends on masking direction, that is, high lean misfire limit is achieved when the port near the spark plug is masked. The mechanism of stratification by masking is different from axial stratification by port throttling. In this case, the rich mixture entering through masked port plays a very important role in the stratification process.

주요기술용어 : Port masking(포트 마스크링), Lean misfire limit(희박연소한계), Swirl(와류), Stratification(성층화), Injection timing(분사시기)

1. 서 론

최근의 가솔린 엔진은 고 흡입 효율에 의한 고출력화를 달성하기 위해 기통 당 2개 이상의 흡입 밸브를 채용하는 다 밸브 시스템을 채용하고 있다. 엔진의 다 밸브화(3 밸브 포함)는 출력 증대의 측면에서는 어느 정도의 효과를 거두었지만 다 밸브 엔진 고유의 단순한 흡입 유동 특성으로 엔진의 실린더 내 유동의 다양

한 이용, 즉 와류 등을 이용한 엔진의 성층화 추구나 이를 통한 희박 연소화 또는 엔진 안전성의 추구는 측면에서는 제약을 받아 왔다. 따라서 상기의 효과를 얻기 위해서 와류 포트와 직선 포트로 구성된 비대칭 포트의 사용, 포트 쓰로틀링(port throttling) 등 여러 가지 방법이 사용되었다.¹⁻³⁾

포트 쓰로틀링을 포함한 비대칭 포트의 사용은 그 효과가 입증되었으나 와류 포트의 최적화, 양산성, 그리고 쓰로틀링 기구의 장착성 등에 문제가 있고 와류 포트와 쓰로틀링 기구에

* 회원, 현대자동차

** 회원, 국민대학교 자동차공학 전문대학원

의한 유량 저하로 심각한 출력의 저하를 초래하기도 한다.

본 연구에서는 엔진의 안정성 확보 및 희박연소 한계의 확장을 위해 비대칭 포트와 쓰로틀링 기구를 채용하는 대신 통상의 포트에 여러 가지 형상의 마스크(masking) 기구를 사용하여 그 효과를 조사해 보고자 한다.

2. 실험 방법

상용의 1.5L SOHC 엔진과 DOHC을 대상으로 하여 본 실험을 실시하였다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 엔진의 연소실 평면도이다.

상기의 엔진에 흡기 대기관(intake manifold)과 헤드 사이에 마스크 판을 삽입하여 그 효과를 조사하였다. Fig. 2에 본 실험에 사용된 마스크의 형상을 도시하였다.

여기서, RVO(rear valve open)는 포트의 전측을 막아 후측으로 주 유동이 생성된 것이고 FVO(front valve open)는 후측을 막아 전측으로 유동을 생

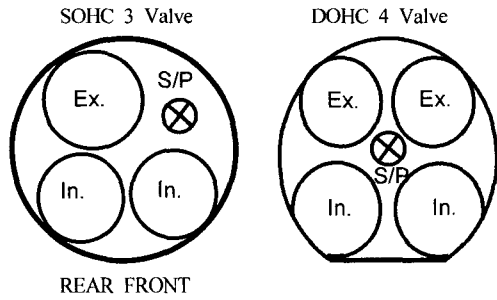


Fig. 1 Combustion chamber

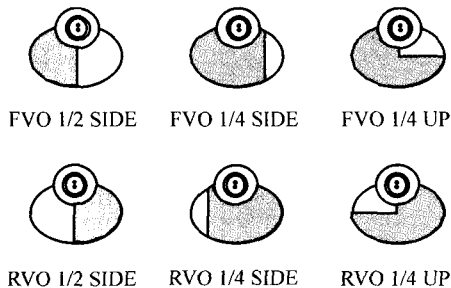


Fig. 2 Masking shapes

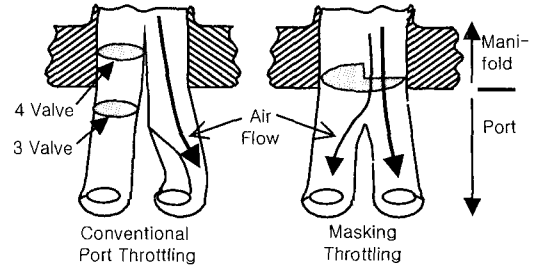


Fig. 3 Port throttling and masking

성시킨 것이다. 인젝터는 2 스프레이와 1 스프레이를 모두 사용하여 양자를 비교하였다. 통상적인 포트 또는 대기관 쓰로틀링의 경우 분리벽(dividing wall)을 연장하여 다른 포트로의 유동을 차단한 반면 본 실험에서는 포트 사이의 분리벽을 연장하지 않고 그대로 사용하여 차단된 포트로도 어느 정도 유동이 존재하게 하였다. 이 차이를 Fig. 3에 나타내었다.

3. 결과 및 분석

3.1 Masking 모양의 영향

Fig. 4는 1/4-Up 마스크에 대해 3 밸브 엔진에서 희박연소 한계(LML : lean misfire limit)를 조사한 것이다. 연료는 2 스프레이 인젝터를 사용하여 양쪽 포트에 모두 연료가 분사되도록 하였고, 그림에 나타난 분사시기는 흡입 상사점을 기준으로 분사종료 시기를 나타낸 것이다. 희박연소는 BMEP COV가 3%를 넘을 때를 실화로 정의하였으며 모든 실험은 부분부하 조건인 2400RPM/2.5Bar BMEP에서 행하였다.

그림에 나타난 바와 같이 와류 포트의 적용 없이 통상의 포트에 단순히 마스크만 적용함으로써 와류 포트를 채용한 상용 희박연소엔진의 희박연소 한계 24 정도보다 높은 25 이상의 희박연소 한계를 구현하였다. 특이한 것은 RVO와 FVO의 결과가 상반되어 나타났는데 FVO의 경우 흡입행정 중 분사는 오히려 희박연소 한계를 악화시키는 결과를 초래하였는데 이는 와류가 없는 3 밸브 엔진의 시험 결과와 매우 유

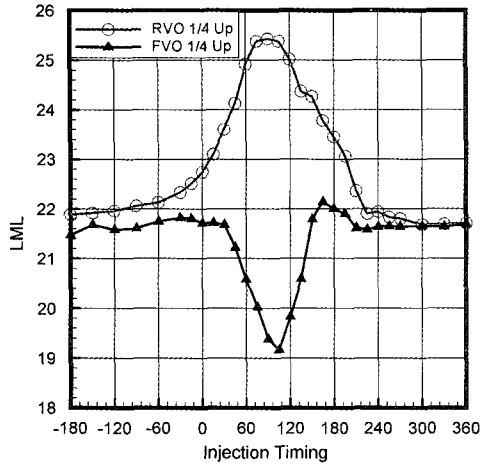


Fig. 4 Masking effects when 1/4-up masked

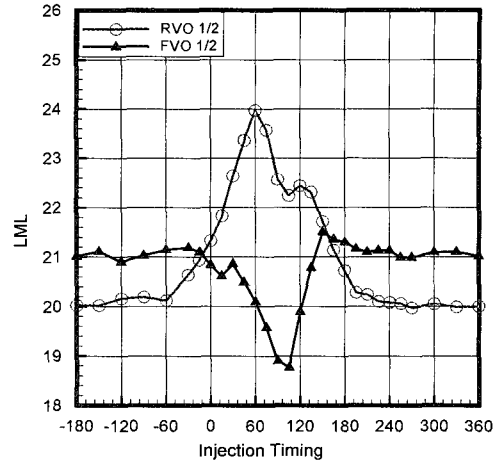


Fig. 6 Masking effects when 1/2 masked

사하다.(Fig. 10 참조)

Fig. 5는 1/4-Side 마스크를 한 경우의 결과이다. 1/4-Side의 경우 전체적인 경향은 1/4-Up과 비슷하지만 대체로 희박연소한계가 낮아져 24 근방의 최대 희박연소 한계를 보이고 있다. 역시 FVO의 경우 흡입 행정 중 분사는 희박연소 한계를 악화시키고 있다.

Fig. 6의 1/2 마스크의 경우도 위의 두 경우와 크게 다르지 않게 결과가 나타나고 있음을 알 수 있다. 다만 이 경우 최적 분사시기가 1/4 경우보다 10-30 CA(crank angle) 정도 일찍 나

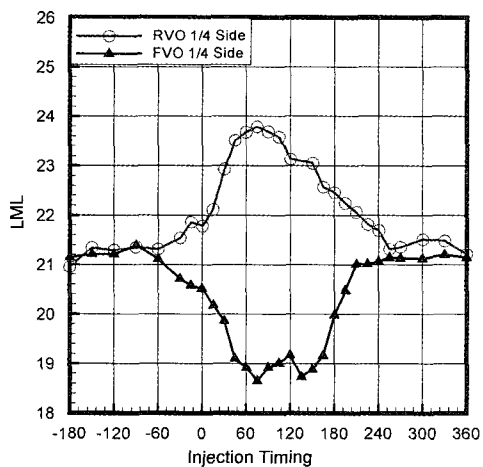


Fig. 5 Masking effects when 1/4-side masked

타나고 있으며, 최적 분사시기의 범위도 1/4 마스크에 비해 좁은 영역에 존재하고 있음을 알 수 있다. 그 밖에도 흡입 행정 외의 분사시기에서 FVO는 1/4 마스크와 비슷한 수준이나 RVO의 경우 희박연소 한계가 1-2 정도 낮게 측정되었다.

Honda와 같은 포트 쓰로틀링 방식의 린번 엔진에서는 1 스프레이 분사를 적용하였는데, 2 스프레이 분사가 마스크 효과에 미치는 영향을 조사하기 위해 1/4-Up 마스크에 1 스프레이 인젝터를 적용하여 동일한 실험을 하였고 이를 Fig. 7에 도시하였다.

그림에서와 같이 마스크 적용시에는 인젝터에 의한 희박연소 특성의 근본적 차이는 존재하지 않는다. 다만 1 스프레이의 경우 2 스프레이에 비해 조금 낮은 수준을 보여주고 있는데 이는 분사된 연료가 분리벽의 중앙에 충돌함으로써 발생하는 웨팅(wetting)의 영향으로 판단된다. 월 웨팅이 크면, 최적의 분사시기를 선택해도 벽에 묻은 일부의 연료는 해당 사이클의 흡기과정에서 들어가지 못하고 다음 흡기과정에서 서서히 들어가게 되어 성층화에 방해가 된다.

마스크 방법이나 연료 분사 방법에 관계없이 항상 RVO의 경우가 희박연소를 확장시켰는데 이는 3 밸브 엔진에서 전측 포트 부근에 점화

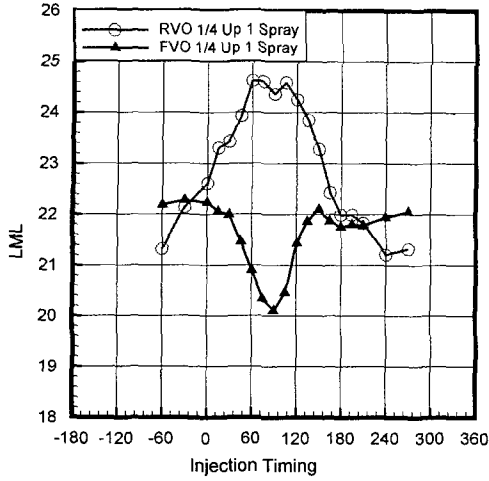


Fig. 7 Masking effects when 1/4-up masked with 1-spray injector

플러그가 존재하기 때문으로 판단되며 이의 확인을 위해 점화 플러그가 연소실 중심에 있는 DOHC 4 밸브 엔진에 1/4-Up 마스크를 적용해 실험하고 이를 Fig. 8에 도시하였다.

그림에 나타나 있듯이 연소실 중앙에 점화 플러그가 위치한 4 밸브 엔진의 경우 3 밸브 엔진에서와 같은 대폭적인 희박연소 한계의 증가는 구현되지 않았다. 다만 다른 행정의 분사에 비해 흡입 행정 중 분사가 그 증가폭이 4

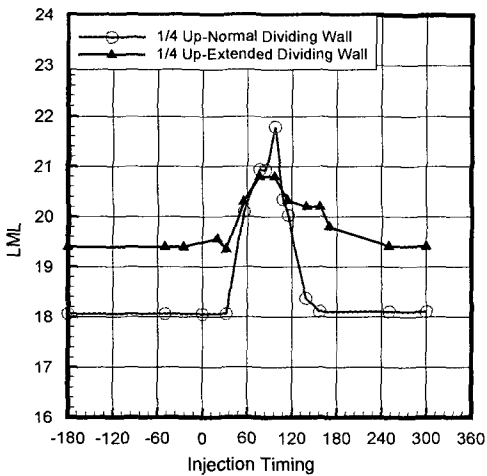


Fig. 8 Masking effects when 1/4-up masked in 4 valve engine

정도로 비슷한 수준임을 알 수 있다. 통상 성층화 효과에 의한 희박연소 한계의 확장 범위가 4-5 정도임을 볼 때 4 밸브 엔진에서도 어느 정도 그 효과가 나타난 것으로 판단되나 쓰로틀링이 없는 기본 상태의 희박연소 한계가 낮아 높은 수준의 희박 연소 한계를 보여주지 못한 것으로 판단된다. 이는 근본적으로 연소실 중앙에 스파크 플러그가 위치한 경우가 한쪽으로 치우쳐 있는 경우에 비해 연소가 불리할 수도 있음을 의미한다. 특이한 것은 분리벽을 연장하여 한쪽 포트에만 유동이 있게 한 경우보다 마스크한 포트에도 유동이 존재하는 경우가 더 좋은 효과를 나타내었다. 절대적인 수준은 1 정도의 차이를 나타내었지만 개선 폭으로 볼 때는 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 이로 미루어 볼 때 마스크에 의해 차단된 포트라도 어느 정도 유동이 존재하는 것이 유리하며 또한 이 유동이 매우 중요한 역할을 함을 알 수 있다.

3.2 Port Throttling과의 비교

이 마스크에 의한 효과를 비대칭 와류 포트와 쓰로틀링을 결합한 축상 성층화의 경우와 비교해 보도록 하겠다.

Fig. 9는 동일한 3 밸브 엔진에서 한 쪽은 통상적인 직선 포트를 그리고 다른 쪽은 와류값을 증대시키기 위해 나선형 와류 포트를 적용하고 직선 포트 쪽의 유동을 차단한 전형적인 포트 쓰로틀링을 적용한 결과이다. 이 중 FVO는 전측 포트가 와류 포트이고 RVO는 후측 포트가 와류 포트인 경우이다.

그림에 나타난 바와 같이 포트 쓰로틀링도 마스크와 거의 동일한 효과를 주고 있음을 알 수 있다. 그러나, 마스크와 비교해 볼 때 대체로 최적 분사시기가 늦게 나타나고 있고 그 범위도 상당히 줄어들고 있음을 알 수 있다. 또한 마스크의 경우 RVO는 희박 연소 한계의 증가로 FVO는 악화로 나타난 반면 포트 쓰로틀링은 두 경우 모두 희박연소 한계가 증가하였다. 그리고 최고 희박연소 한계는 FVO가 높은 반면

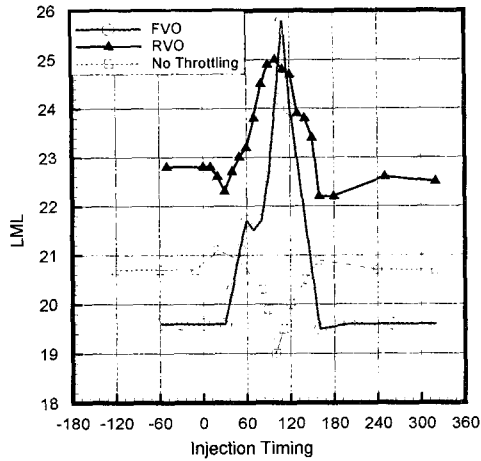


Fig. 9 Port throttling effects on LML

RVO는 최고점은 낮으나 그 범위가 넓고 흡입 행정 이외의 분사시기에서도 상당히 높은 희박연소 한계를 보여주어 거의 23 근방에 이르고 있음을 알 수 있다.

이상의 사실로 미루어 볼 때 마스크잉에 의한 성층화는 같은 쓰로틀링임에도 불구하고 그 매커니즘이 통상적인 쓰로틀링과는 매우 다름을 유추할 수 있다. 특히 마스크잉에 의한 경우 그 와류값이 상당히 낮아 와류와 분사시기에 의한 축상 성층화의 모델로는 설명이 불가능하다. Fig. 9에 도시되어 있듯이 와류 포트를 이용한 축상 성층화의 경우는 희박연소 한계가 와류값에 매우 민감하여 충분한 와류가 확보되지 않으면 희박연소 한계의 정점이 두 곳에서 나타나는 경향이 있다. 통상적인 포트 쓰로틀링의 경우 와류값(여기서는 리카도 와류 값: RS) 3.3 이하에서는 축상 성층화의 효과가 충분히 발생하지 않아 연료 분사시기에 따른 희박연소 한계가 두 곳에서 최고점을 나타내고 있다.

마스크잉의 경우 특별히 와류의 증가를 위해 포트를 변형시키지 않았고 분리벽을 설치하지 않았기 때문에 모든 경우에 와류값은 포트 쓰로틀링보다 상당히 작게 측정되었으며 이를 Table 1에 정리하였다.

본 시험에서는 인젝터를 마스크잉 쓰로틀링 하

Table 1 Ricardo swirl number according to masking method

	BVO	FVO	RVO
Normal port	0.01	2.38	2.40
1/2-Side	-	1.05	1.10
1/4-Side	-	0.67	0.26
1/4-Up		0.94	0.69

류에 장착하였다. 흡입 유동은 한쪽으로 주로 편중되므로, 마스크잉에서 열린 쪽으로 먼저 연료가 유입된다. 반대쪽은 상대적으로 흡입 유동이 약하므로 다소 늦게 유입된다. RVO의 경우는 후측 포트로 분사된 연료가 먼저 유입되고 전측 포트 쪽으로 분사된 연료가 느리게 진행하여 전측 포트와 근접한 점화 플러그 주위에 도달하는 것으로 판단된다. FVO는 유사한 과정으로 점화 플러그의 반대쪽에 모이는 좌우 성층화가 지배적 역할을 한 것으로 판단된다.

Fig. 10에도 나타나 있듯이 포트 쓰로틀링에서는 와류값이 3.3 이하이면 분사시기에 따른 LML 변화에 2 정점(double peak)이 발견되었다. 이러한 2 정점의 이유는 각각 텀블과 와류에 의한 성층화로 설명되었다.³⁾ 그러나, 포트 마스크잉을 적용한 본 시험에서는 스웰값이 적용에

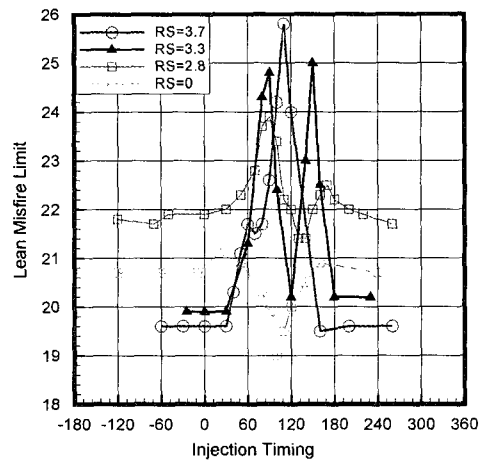


Fig. 10 Swirl effects on LML when port throttling

도 불구하고 2 정점의 경향이 거의 나타나지 않았다.

이러한 차이를 유발하는 원인에 대해 검토해 보기 위해 양자의 차이점을 정리하면 다음과 같다. 그 차이는 첫째, 와류 포트를 사용하지 않고 직선 포트만을 사용한 점, 둘째, 1 스프레이를 사용하지 않고 2 스프레이 인젝터를 사용한 차이, 셋째, 인젝터 하류에 쓰로틀링 구조가 장착된 구조와 인젝터 상류에서 마스킹을 한 점 등이다.

본 시험에서는 양쪽 포트가 전부 직선 포트이고, 마스킹의 하류에서 연료를 분사하기 때문에, 월 웨팅이 적고 짧은 기간에 연료가 연소실로 유입될 수 있다. 이러한 구조는 점화 플러그 주위에 농후한 혼합기를 모을 수 있어서 LML 증가에 도움을 준다. HONDA의 희박연소 엔진 개발과정에서도 분사된 연료 중 그 사이클에 바로 유입되는 연료의 비율을 정량화하여 이를 개선하려는 노력을 하였다.⁴⁾ 즉, 성층화된 연료가 물리는 (상/하, 좌/우) 방향은 유동구조에 따라 정해지며, 성층화의 정도(공연비분포의 불균일성)는 분사 시기가 적절하고, 분사기간이 짧고, 월 웨팅이 적을수록 높아진다.

그러나, 1 스프레이를 적용한 Fig. 7의 경우를 보면, 분리벽에서의 웨팅의 증가로 LML은 24.6 정도로 다소 낮아졌지만 2 정점의 경향은 미미하였다. 따라서, 웨팅은 LML을 저감시키지만 2 정점의 원인은 아닌 것으로 보이며, 포트 쓰로틀링에서 한쪽 포트로만 연료가 유입되는 구조가 2 정점의 원인이었던 것으로 사료된다. 도시되지는 않았지만, 4 밸브의 경우에서도 포트 쓰로틀링이면서 인젝터가 하류에 장착된 경우에는 와류가 약해도 2 정점 현상이 관찰되지 않았다.

4. 결 론

본 시험에서는 상용 3 밸브와 4 밸브 엔진에

마스킹 판을 삽입하여 총 여섯 가지의 경우에 대해 실험하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) RVO의 조건에서는 흡기중 분사에 의해 LML이 증가하고, FVO의 조건에서는 감소한다. 이것은 점화플러그가 전측에 있기 때문에 나오는 결과로서, 와류에 의한 비대칭성이 생겼을 때 점화플러그가 좌/우 중 어느 한 쪽으로 치우쳐 있는 것이 유리하다는 것을 보여준다. 본 시험의 결과에서는 점화 플러그의 반대쪽으로 주유동이 유입되는 것이 유리하였다.

2) 압축과정중 분사 조건에서는 FVO의 LML이 RVO와 동등 또는 우세하다.

3) 최대의 LML은 RVO 1/2, RVO 1/4-Side, RVO 1/4-Up에서 각각 24.0, 23.8, 25.4 정도였다. RVO 1/4 SIDE는 RVO 1/2 SIDE에 비해 공연비가 넓은 영역에 걸쳐서 증가한다.

4) 마스킹에 의한 성층화는 와류 포트를 이용한 축상성층화와 달리, 낮은 와류값에서 유동 속도가 서로 다른 좌/우 포트에 같은 연료량을 분사함으로써 좌/우 성층화 효과를 얻은 것으로 판단된다.

5) 포트 마스킹에서 1 hole injector를 적용하면, 웨팅의 증가에 의해 LML이 저하한다.

참 고 문 헌

- 1) T. Inoue et al., "Toyota Lean Combustion System - The Third Generation System," SAE 930873, 1993.
- 2) K. Horie et al., "The Development of a High Fuel Economy and High Performance Four-Valve Lean Burn Engine," SAE 920455, 1992.
- 3) I. Y. Ohm, K. S. Jeong and I. S. Jeung, "Effects of Injection Timing on the Lean Misfire Limit in an SI Engine," SAE 970028, 1997.
- 4) Y. Hardaulupas et al., "Influence of Injection Timing on In-Cylinder Fuel Distribution in a Honda VTEC-E Engine," SAE 950507, 1995.