

포트 마스킹이 엔진의 부분부하 성능에 미치는 영향: Part II - 배기 및 연비특성

Effects of Port Masking on Part Load Performance: Part II - Emission and Fuel Economy

이 원 근*, 엄 인 용**
Wonggeun Lee, Inyong Ohm

ABSTRACT

This paper is the second of companion papers, which investigate port-masking effects on emission and fuel economy. Port-masking was applied to commercial SOHC 3-valve engine by inserting masking plates between manifold and port. To induce various conditions of stratification, six types of masking plates were applied. In this paper, main interest is focused on the influence of injection timing on emission and fuel economy.

Various injection timing was applied to the six cases, under the stoichiometric and lean-limit air-fuel ratio. Under the stoichiometric condition, an explanation about the reason of the change in emission level due to injection timing change is given. It is observed that NOx emission under the LML condition varies significantly when the injection timing changes.

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

1. 서 론

난류강도의 강화에 따른 연소안정성 증가는 cycle-to-cycle 변동을 줄이고, 희박연소와 점화 시기 지각을 가능하게 함으로써 연비와 배기 향상에 기여하는 것으로 알려져 왔다.¹⁻³⁾ 스웰 또는 텀블 유동을 발생하여 난류강도를 강화하기 위한 방법으로는 여러 가지가 제안되었는데, 밸브 리프트를 변화시키는 방법과 와류 포트와 직선 포트에 구성된 비대칭 포트의 사용, 포트

쓰로틀링(port throttling) 등 여러 가지 방법이 사용되었다.^{3,4)} 복잡한 포트 쓰로틀링이나 비대칭 포트의 사용은 포트의 최적화가 어렵고 양산편차가 크며, 사양의 이원화로 인한 원가부담 등이 문제가 되고 있다. 따라서, 최근의 연구에서는 흡기관 내에 마스킹(masking) 기구를 사용하여 스웰과 텀블이 적절히 조화된 유동을 발생하여 연료분포와 연소안정성을 최적화하려는 시도가 이루어지고 있다.¹⁻³⁾

본 연구에서는 엔진의 안정성 확보 및 희박연소 한계의 확장을 위해 비대칭 포트와 쓰로틀링 기구를 채용하는 대신 통상의 포트에 여

* 회원, 현대자동차

** 회원, 국민대학교 자동차공학 전문대학원

러 가지 형상의 마스크(masking) 기구를 사용하여 그 효과를 조사해 보고자 한다.

2. 실험 방법

상용의 1.5L SOHC 엔진을 대상으로 하여 본 실험을 실시하였다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 엔진의 연소실 평면도와 마스크에 대한 개략도이다.

아래의 엔진에 흡기 다기관(intake manifold)과 헤드 사이에 마스크 판을 삽입하여 그 효과를 조사하였다. 통상적인 포트 또는 다기관 쓰로틀링의 경우 분리벽(dividing wall)을 연장하여 다른 포트로의 유동을 차단한 반면 본 실험에서는 포트 사이의 분리벽을 연장하지 않고 그대로 사용하여 Fig. 1에 도시된 바와 같이 차단된 포트로도 어느 정도 유동이 존재하게 하였다.

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 생성시킨 것이다. 인젝터는 2 스프레이와 1 스프레이를 모두 사용하여 양자를 비교하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 희박연소 한계

Fig. 3은 여러 마스크 중 RVO의 경우에 대해 희박연소 한계(LML : lean misfire limit)를 조사한 것이다. 그림에 나타난 분사 종료시기는 흡입 상사점을 기준으로 한 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. 특히 1/4-Up 마스크의 경우가 가장 좋은 효과를 나타내었다. Fig. 4는 FVO 마스크를 한 경우의 결과이다.

FVO는 RVO와는 달리 흡입행정 중 분사는 오히려 희박연소 한계를 악화시키는 결과를 초래하였는데 이는 마스크의 방향과 점화 플러그의 상대적 차이에 의한 것으로 판단되며 자세

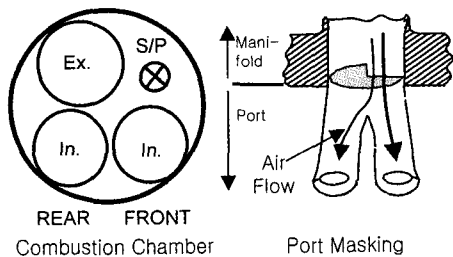


Fig. 1 Combustion chamber and port masking

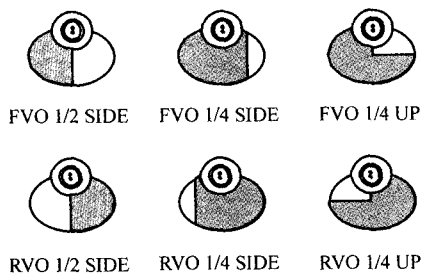


Fig. 2 Masking shapes

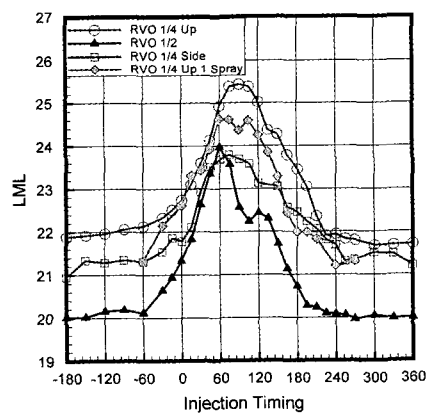


Fig. 3 Masking effects in case of RVO

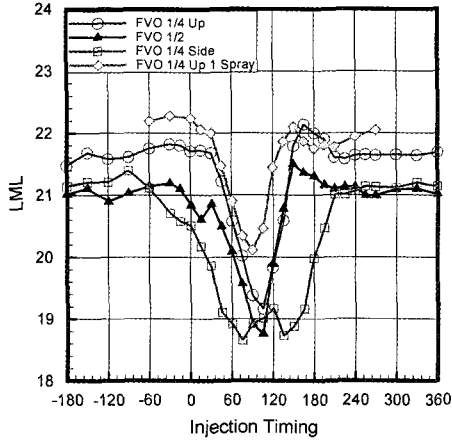


Fig. 4 Masking effects in case of RVO

한 논의는 이 논문의 Part I에서 하였기 때문에 생략한다.

3.2 이론 공연비에서의 특성

Fig. 5와 6에 공연비 14.5에서 분사시기 변경이 배기에 미치는 영향을 살펴보았다. 모든 경우에 S/A는 22.2도로 설정되었는데, 이것은 거의 MBT(minimum spark advance for best torque: 최적 점화시기)에 가까운 값이다. 몇가지 차이가 있으나, 모든 경우에 배기수준의 경향은 공통점이 있는데, 그것은 다음과 같다.

첫째, ATDC 10도 정도에서 HC는 증가하고 CO는 감소하며 NOx는 거의 변화가 없다. 둘째 ATDC 100도 정도에서 HC는 감소하고 CO는 최대값이 되며 NOx는 감소한다. 셋째, ATDC 160도 정도에서 HC는 증가하고 CO는 감소하며 NOx는 변화가 적다.

각각의 경우에, peak의 위치는 약간 다르다. 또한, 둘째 경향만이 두드러지고 나머지는 경향이 미미한 경우도 있지만, 이러한 경향이 가장 두드러진 FVO 1/2-Side의 경우를 예로 들어 설명하면 다음과 같다.

여기서 분사시간은 평균 연료소모율 0.76g/s와 injector 유량 115g/min을 고려할 때 크랭크 각으로 71도 정도이며, LML(연료소모율 0.69g/s)

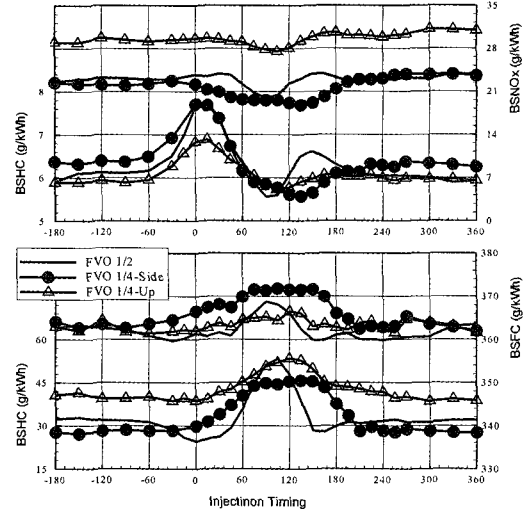


Fig. 5 Emission and FE of FVO at stoichiometric

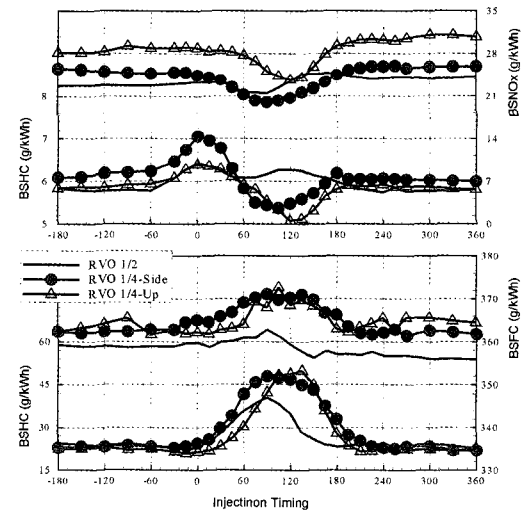


Fig. 6 Emission and FE of RVO at stoichiometric

에 이르러서는 65도 정도가 된다. 각각의 분사시간은 동일하더라도 연료가 연소실 안으로 유입되는데 걸리는 시간은 흡입유동의 속도에 따라 다르다.

한편, 흡기밸브 주위의 유동은 밸브 겹침기간(valve overlap) 구간에서는 연소압에 의해 약간의 역류가 있으며, 약 90도 부근에서 최고 속도로 유입되어, 180도 이후에서는 피스톤 상

승에 의해 흡입 혼합기를 다시 토해내게 된다. 따라서, IVO(intake valve open)에서 훨씬 이전에 밸브에 도달한 연료는 벽면에 연료막을 형성했다가 흡입유동에 증발하면서 들어가므로 분사시기의 영향을 거의 받지 않는다. IVO 직전에 밸브에 도달한 연료는 바로 들어가지 못하고 뜨거운 연소가스의 역류와 만난 후 유입된다. 따라서, 연료의 증발이 좋으며 혼합기 조성이 균일하여 CO가 저감된다. 그러나, 피스톤이 상사점 부근에 있을 때 연료가 들어가면 틈새(crevice)에 연료가 들어가기 쉬워지므로 HC 생성이 많아지는 것으로 보인다. IVO 이후 어느 정도 시간이 지나서 도달한 연료는 유동에 실려 바로 유입된다. 이때는 피스톤이 상사점에서 많이 내려가 있는 상태이므로 HC 발생이 적다. 반면에 흡기과정중의 짧은 시기에 집중적으로 연료가 들어가므로 혼합기가 균일하게 분포하지 못하고, 연료의 무화가 좋지 못해서 그 결과 연소가 불완전해져서 CO의 생성이 증가하고 NOx가 감소한 것으로 보인다. 이 조건에서는 토오크도 불안정해진다. IVC(intake valve close) 직전에 도달한 연료는 비교적 강한 역류를 만나서 정체되었다가 일부는 벽에 붙고 일부는 다음번 흡기과정에서 한꺼번에 몰려들어 가게 된다. 그 결과 HC가 다소 증가한다.

여섯 가지 마스킹의 결과는 거의 유사한 경향을 보인다. 마스킹 조건에 따라 몇가지 특징적인 면은 다음과 같다.

- 1) HC의 평균적인 수준은 열린 모양에 따라 큰 차이가 없으며, 다만 RVO 쪽이 분사시기 변화에 따른 변화가 적다.
- 2) NOx의 수준은 1/2-Side가 가장 적고, 1/4-Side에서 더 크며, 1/4-Up에서 가장 크다. 이것은 와류 및 난류강도 증가, 성층화에 의한 급속 연소의 경향이라고 볼 수 있다.
- 3) CO의 수준은 RVO의 경우가 모양에 관계 없이 가장 적고, FVO 1/4-Side, FVO 1/2-Side, FVO 1/4-Up으로 가면서 점점 커진다.

BSFC(break specific fuel consumption) 변화를

보면, 앞의 BSCO 경향과 유사하게 전반적으로 120도 전후한 부분에서 연비가 악화되는 패턴을 보이며, RVO의 경우가 FVO보다 다소 연비가 좋다. 또한, 공통적으로 1/2-Side의 조건이 BSFC가 낮은데, 이 1/2-Side 조건의 BSFC는 마스킹을 전혀 안한 것보다도 낮았다. 스월이나 텀블의 증가에 의한 급속연소는 time loss를 줄여서 연비향상에 도움이 되지만, 지나치게 큰 스월이나 텀블은 펌핑 손실을 증가시키고⁴⁾ 벽면으로의 열전달량을 늘리므로⁶⁾ 연비에 유리하지 않다고 알려져 있다. 따라서 연비가 최소가 되는 적정 스월이 존재하는 것으로 사료된다.

3.3 공연비에 따른 특성

RVO 조건에서 희박연소 한계가 최대가 되는 분사시기에서의 2400 rpm /2.5 bar BMEP에서의 공연비 변경 시험 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그 결과를 보면, 우선 BSFC는 RVO 1/2이 가장 낮고 RVO 1/4-Up, RVO 1/4-Side의 순으로 악화된다. 이것은 유동저항의 증가에 의한 것으로 보여진다. Fig. 8의 MAP(manifold absolute pressure : 흡기관 절대압) 비교의 결과에서는 1/4-

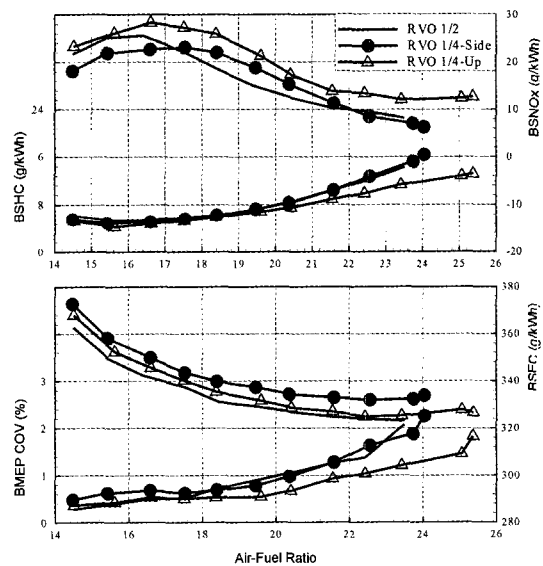


Fig. 7 Emission and FE according to AFR at RVO

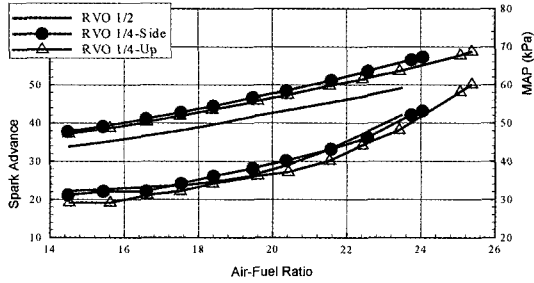


Fig. 8 S/A and MAP according to AFR at RVO

Up에서 동일 BMEP를 얻기 위해서는 더 많은 공기와 연료를 넣고, 더 높은 IMEP 조건에서 운전되어야 하는 것을 보여준다. 공연비 증가에 따라 MBT는 19~22도 정도에서 약 50도까지 증가하였다. 공연비 14.5에서 마스크잉이 없는 경우의 MBT가 32도 정도인 것을 감안하면 약 10도 정도가 지각되었다. 이로부터 마스크잉은 난류강도 증가나 성층화를 유발해 급속연소를 가능케 하는 것을 알 수 있다. BSHC는 RVO 1/2과 RVO 1/4-Side는 동등수준이고 RVO 1/4-Up은 낮은 편인데, 인젝터 주위의 강한 유동이 연료의 무화를 촉진한 것으로 보인다. BSNOx는 낮은 공연비와 높은 공연비에서 마스크잉에 따른 경향이 다른데, 최대값에 이르는 공연비가 RVO 1/2, RVO 1/4-Up, RVO 1/4-Side로 바뀔에 따라 점점 커지는 것을 알 수 있다.

3.4 희박연소한계에서의 특성

Fig. 9, 10에 희박연소 한계에서의 배기, 연비, S/A 등을 보였다. 이 여섯 가지 masking으로부터 얻어지는 주요 결과는 다음과 같다.

1) 압축과정중 분사 조건에서는 FVO의 LML이 RVO와 동등 또는 우세한데, 전반적으로 BSFC가 더 적다. FVO와 RVO가 동일 LML을 보이는 분사시기에서는 FVO가 MBT가 더 지각되었는데도 FVO의 BSNOx가 RVO에 비해 상당히 컸다.

2) RVO에서 최대 LML이 되는 분사시기는 BSNOx가 최대가 되는 분사시기보다 30도 정도

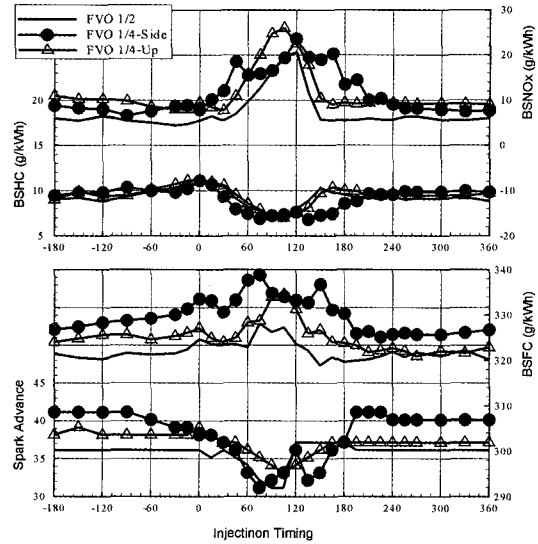


Fig. 9 Emission and FE of FVO at LML

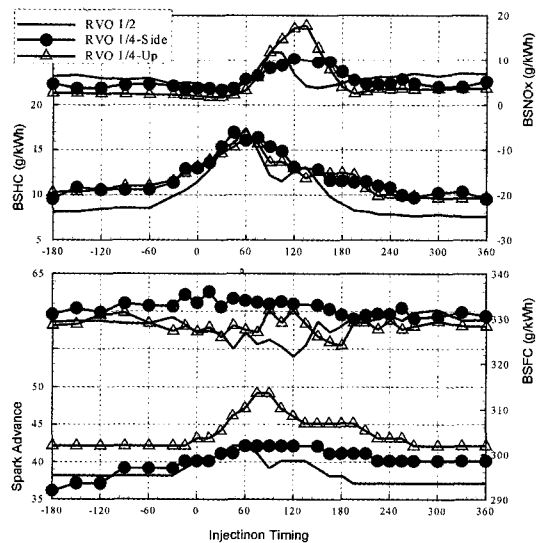


Fig. 10 Emission and FE of RVO at LML

이전이다. 여기서 분사시기를 45도 정도 앞당기면, LML은 약간 감소하지만 NOx의 대폭 저감을 가져올 수 있다. 예를 들어, RVO 1/4 UP에서는 분사시기 90도에서 LML 25.4, BSNOx 12.01인데, 분사시기 135도에서는 LML 24.4, BSNOx 17.78이고, 분사시기 45도에서는 LML 24.1, BSNOx 2.2가 된다. BSFC가 거의 같은 조

건에서 BSNOx가 최소인 분사시기를 선택할 수 있는 것이다. Honda의 연구결과에서도 이와 유사한 경향이 언급되었다.⁴⁾

시험 결과를 보면 BSHC는 LML 조건의 공연비에 따라 크게 변하므로 LML이 다른 상태에서 상대비교가 되지는 않으나, FVO의 경우 실화(misfire)가 나는 조건에서도 BSHC는 크지 않다는 것을 알 수 있다. 이것은 흡기중 분사에서 공연비 23 이상인 RVO의 실화와 공연비 19 이하인 FVO의 실화는 전혀 다른 메카니즘을 갖는 것임을 보여준다. 그것은 점화 플러그 주위가 상대적으로 농후하면서 전체적으로 공연비가 높은 경우와 그 외 지역은 오히려 공연비가 낮은데도 점화플러그 주위만 희박해서 생기는 실화(또는 부분연소)의 차이로 판단된다.

본 시험의 결과에서 NOx의 경향을 보면, RVO 1/2-Side은 분사시기에 관계없이 전체적으로 높고, RVO 1/4-Up은 분사시기에 따라 차이가 매우 크다. LML에서의 MBT 또한 급격한 변화를 보이고 있다. 흡입과정중 분사에 의한 성층화는 RVO 1/4-Up이 가장 큰 것으로 보인다. LML이 증가하는 구간에서의 NOx 증가 또한 다른 구조에 비해 크다.

다음으로는 압축과정 중 분사구간에서의 경향에 대해 검토하고자 한다. 압축과정중 분사와 흡입과정 중 분사를 비교해 보면, 압축과정 중 분사된 연료는 밸브 상면과 포트 벽면에 묻어 있다가 들어가므로, 같은 유동구조라면 분사시기의 영향을 거의 받지 않는다. 그러나, 마스킹에 따른 흡기유동 구조의 차이는 벽면에 묻은 연료가 연료실 내로 유입되는 시기와 기간을 다르게 하므로 혼합기 분포에 영향을 줄 수 있다.

압축과정 중 분사의 구간에서 FVO에서의 결과를 보면, FVO 1/2-Side, FVO 1/4-Side, FVO 1/4-Up에서 각각 LML은 21, 21.2, 21.5로 약간 커지면서 BSNOx는 6, 8, 9 정도로 차츰 증가하는 것을 보여준다. 반면에, RVO에서의 결과를 보면, RVO 1/2-Side, RVO 1/4-Side, RVO 1/4-Up

에서 각각 LML은 20, 21, 22로 점차 커지면서 BSNOx는 6, 4, 3 정도로 차츰 감소하는 것을 보여준다. 거의 같은 LML을 갖는 분사시기(압축과정 중)에서 RVO에 비해 FVO의 MBT가 지각되면서도 NOx 발생이 많은 것은 FVO쪽이 연소속도가 빠르기 때문인 것으로 생각된다.

LML 증가가 전적으로 난류강도의 증가에 따른 연소속도의 증가에 의한 것이라면, 연소속도가 빠른 FVO가 RVO에 비해 LML이 낮은 것이 잘 설명되지 않으며, LML 증가가 전적으로 성층화에 있다고 하면, RVO의 여러 사양 중에서 LML이 가장 높은 RVO 1/4-Up에서 BSNOx가 낮은 것이 잘 설명이 되지 않는다. 가능한 한가지 가설은 RVO 1/4-Up의 유동 구조가 점화 플러그 주위에 연료가 모이게 하는 구조이면서도 이외의 구간에서 연료가 지나치게 성층화되지 않도록 하는 구조라는 것이다.

4. 결 론

본 시험에서는 상용 SOHC 3 밸브 엔진에 마스킹 판을 삽입하여 시험을 실시하고 배기 및 연비에 대해 조사하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

- 1) 공연비 14.5에서 HC의 평균적인 수준은 열린 모양에 따라 큰 차이가 없으며, 다만 RVO 쪽이 분사시기 변화에 따른 변화가 적다.
- 2) 공연비 14.5에서 NOx의 수준은 1/2-Side가 가장 적고, 1/4-Side에서 더 크며, 1/4-Up에서 가장 크다. 이것은 성층화 및 난류강도 증가에 의한 급속연소의 경향이라고 볼 수 있다.
- 3) 공연비 14.5에서 CO의 수준은 RVO 경우가 모양에 관계없이 가장 적고, FVO 1/4-Side, FVO 1/2-Side, FVO 1/4-Up으로 가면서 점점 커진다.
- 4) 희박연소 한계에서 RVO의 조건에서는 흡기중분사에 의해 LML이 증가하고, FVO의 조건에서는 감소한다.
- 5) 희박연소 한계에서 압축과정중 분사 조건

에서는 FVO의 LML이 RVO와 동등 또는 우세하고, 전반적으로 BSFC가 더 적다. 그러나, FVO가 RVO에 비해 MBT MBT가 더 지각되었는데도 BSNO_x가 상당히 컸다.

6) RVO에서 최대 LML이 되는 분사시기는 BSNO_x가 최대가 되는 분사시기보다 30도 정도 이전이다. 여기서 분사시기를 45도 정도 앞당기면, LML은 약간 감소하지만 NO_x의 대폭 저감을 가져올 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) T. Urushihara et al., "Turbulence and Cycle-by-Cycle Variation of Mean Velocity Generated by Swirl and Tumble Flow and their Effects on Combustion," SAE 950813, 1995.
- 2) T. Urushihara et al., "Effects of Swirl/Tumble Motion on In-Cylinder Mixture Formation in a Lean-Burn Engine," SAE 961994, 1996.
- 3) M. Tomita et al., "Effects of Gas Flow and Mixture Properties on Engine-Out HC Emissions," SAE 961952, 1996.
- 4) K. Horie et al., "The Development of a High Fuel Economy and High Performance Four-Valve Lean Burn Engine," SAE 920455, 1992.
- 5) T. Inoue et al., "Toyota Lean Combustion System - The Third Generation System," SAE 930873, 1993.
- 6) J.-L. Saulnier et al., "Effects of Aerodynamics on Fuel Consumption of a Multi-valve S-I Engine. Investigation of the Instantaneous Local Heat Transfer at Part Loads and Distint Equivalence Ratios," SAE 972938, 1997.