

## 노즐특성이 Small HSDI 디젤엔진의 성능에 미치는 영향

### Study of Nozzle Characteristics on the Performance of a Small HSDI Diesel Engine

류 명 석\*  
Myungseok Lyu

#### ABSTRACT

VCO nozzle is devised to minimize the HC emission and has been applied on some HSDI diesel engines. But it is not well reported whether VCO nozzle would be advantageous over SAC nozzle in a small HSDI diesel engine. In this paper it is presented that characteristics of VCO and SAC nozzle under common rail fuel injection system and their effects on the performance in a small HSDI diesel engine.

주요기술용어 : HSDI diesel engine(고속 직분식 디젤엔진), VCO nozzle(VCO 노즐), SAC nozzle(SAC 노즐), Common rail(커먼레일), HC (탄화수소)

#### Nomenclature

A : area  
 $C_d$  : discharge coefficient  
 $\rho$  : density  
 $\Delta P$  : pressure difference  
Q : flow rate  
T : torque  
 $\omega$  : angular speed  
I : moment of inertia  
 $X_{tw}$  : radial penetration without swirl  
 $X_t$  : radial penetration with swirl  
 $Q_a$  : rate of change of the momentum flux of swirling air  
 $Q_j$  : rate of change of the mean momentum flux in fuel jet at nozzle orifice  
MEIP : mean effective injection pressure

#### 1. 서론

최근 디젤엔진개발은 동일 배기량 대비 고 성능화 되고 있으며, 또한 강화되고 있는 배기 규제에 맞추어 개발되어야 한다. 이에 엔진의 성능 및 배기유해물 제어에 가장 큰 영향을 미치는 연료분사장치의 특성에 관한 연구가 수행되어야 한다. 특히 연료 분사에 가장 큰 영향을 주는 노즐특성에 따른 연구가 엔진개발 선행단계에서 수행되어야 할 것이다.<sup>1)</sup>

본 연구에서는 연료분사장치내 두가지 노즐형태(SAC,VCO)가 엔진성능에 미치는 영향에 관하여 고찰하고자 한다. 현재 디젤엔진

\* 회원, 현대·기아자동차

에서의 탄화수소(HC)가 분사 노즐의 SAC 체적의 크기와 비례 관계를 가지고 있음이 알려지면서 이를 줄이기 위한 노력이 이루어지다가 새로운 형태의 노즐인 VCO 형태의 노즐이 고안되어 적용 되고 있다.<sup>2)</sup> VCO 노즐과 SAC 노즐의 구조적인 특징은 Fig.1 과 같다. SAC 형태 노즐에서 연료는 니들(Needle)이 상승하면서 SAC 으로 불리는 공간을 거쳐 노즐 홀을 통해 분사된다. VCO 노즐에서 연료는 니들(Needle)이 들리면 SAC 을 거치지 않고 직접 노즐 홀에 이른 후 연소실로 분사된다.

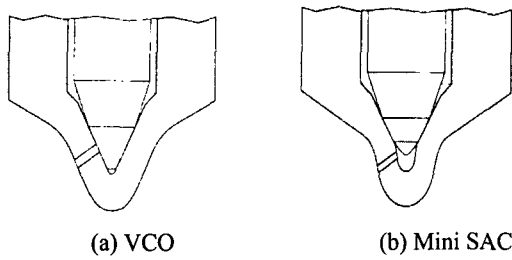


Fig. 1 VCO and mini SAC type nozzle in common rail

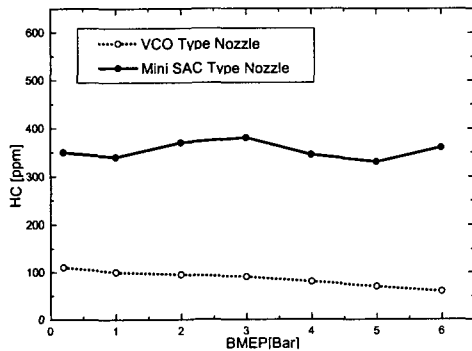


Fig. 2 Typical HC emission in a HSDI diesel engine at 2500 rpm

연료분사가 끝난 후, 엔진의 폭발, 배기과정의 진행됨에 따라 연소실 압력이 낮아져 SAC 노즐에서는 SAC 에 머물러 있던 연료

가 흘러나와 HC 의 원인이 된다.<sup>1)</sup> Fig.2 는 VCO 가 SAC 노즐에 비해 HC 저감에 효과적임을 보여주고 있다. 이렇게 VCO 노즐이 HC 저감 측면에서 SAC 에 비해 유리한 점은 많이 알려지고 있으나 엔진 성능관점에서의 비교 연구에 대한 보고는 적다. 이에 본 연구에서는 엔진성능개발 측면에서 가장 어려운 초소형 HSDI 디젤엔진을 대상으로 VCO 노즐과 SAC 노즐을 비교하여 두 형태의 노즐 특성에 따른 엔진 성능 차이를 비교분석하였다.

Table 1 Specification of engine and FIE

Model	Single HSDI Diesel Engine
Type	In-line, 4 Valve DOHC
배기량[cc]	374
BORE[mm]	75.5
Stroke[mm]	83.5
T/C	Boosting & After cooling System
FIE	Common Rail (Maximum Pressure : 1350 Bar)
Nozzle	Flow Rate 305mm <sup>3</sup> /s 0.128x152x6 (Mini SAC) 0.137x152x6 (VCO)
Combustion Chamber	Reentrant Type : TLS01, TLS02

Combustion Chamber for Single HSDI Diesel Engine

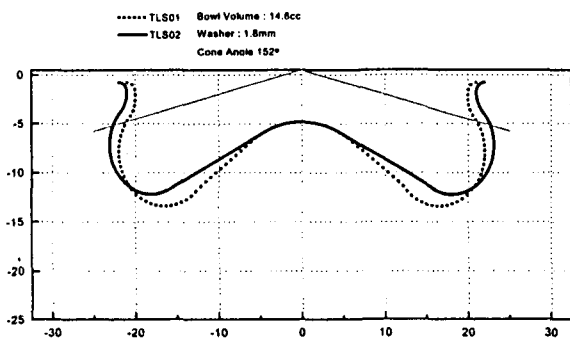


Fig. 3 Test combustion chamber

HSDI 디젤엔진의 성능 제약 조건인 Smoke 를 줄이기 위한 것에 초점을 맞춰 시험과 분석을 진행하였고 연소실과의 관계를 파악하기 위해 두 가지 형태의 연소실을 적용하여 비교 분석하였다. 시험 대상 엔진의 사양은 Table1 과 같고 연소실은 Fig.3 으로 동일 Volume 에서 연소실 직경과 높이에 차이가 있다.

## 2. VCO 와 Mini SAC 노즐의 유동특성

노즐의 유동특성을 보기 위해 100 Bar 의 압력을 주어 유량을 측정된 결과 Fig.4 과 같은 결과를 얻었다.

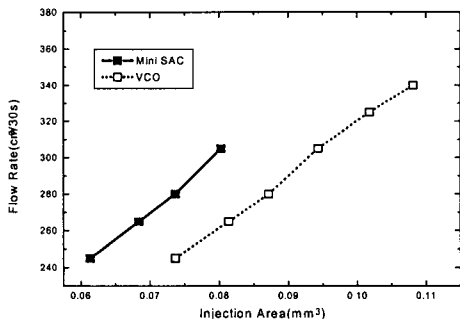


Fig. 4 Flow rate in VCO and mini SAC nozzle

동일압력에서 분사면적이 커지면 유량도 증가하는 노즐 특성이 나타나고 있다. VCO 형태의 노즐 유량이 Mini SAC Type 에 비해 작은 것을 볼 수 있다. 유동 특성을 보기 위해 식(1)을 이용하여  $C_d$  을 계산하였다.

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

$C_d$  는 Fig.5 와 같이 VCO 가 Mini SAC 에 비해 약 18% 정도 작게 나타났다.

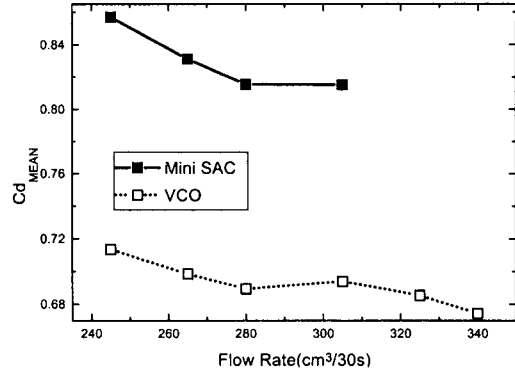


Fig. 5 Mean  $C_d$  in VCO and mini SAC nozzle

엔진 성능향상을 위해서는 필요한 연료를 일정시간에 분사가 이루어지도록 분사시간을 유지시켜주는 것이 중요하다.<sup>2)</sup> VCO 노즐에서 Mini SAC 과 동일 연료량이 동일한 분사시간을 유지하며 분사되게 하기 위해서는 식(1)에 의하면 압력을 증가시키거나 혹은 노즐 홀 직경을 증가하여 분사면적 A 를 크게 해야 한다. VCO 와 Mini SAC 노즐의  $C_d$  차이가 18%임을 감안하여 Table2 와 같이 각 경우에 대해 비교해 보았다. ①은 분사압력이 동일할 경우로 노즐 홀 직경을 약 4.2%증가해야 함이 식(1)에 의해 계산되었다. ②는 분사면적이 동일한 경우로 48% 정도 분사압력 증가는 약 50%정도의 구동력 증가가 필요하여 BSFC 에 상당한 악영향을 미칠 것으로 예상된다. 또한 이러한 압력 상승은 고압 분

Table 2 Estimation of the flow rate by equation(1)

분사기간 동일	①	분사 압력 동일	18%증가, Nozzle Hole Diameter 4.2% 증가
	②	Injection Area 동일	48%증가, Pump 구동력 증가 ( 50% ) <sup>2)</sup>

사 펌프가 근본적으로 변경되지 않는 한 현실적으로 불가능하다. 이러한 점으로 인해 ①의 경우와 같이 VCO 노즐 홀의 직경을 SAC에 비해 크게 하는 것이 실용적이다.

초소형 HSDI 디젤엔진에서는 실린더 Bore가 작아 Spray Penetration 이 중요한 변수가 된다. VCO와 Mini SAC 노즐의 Penetration 은 Fig.6 과 같이 나타났다.<sup>3)</sup> 여기서 두 형태 노즐의 구조차이에 의한 Penetration 을 비교해 보기 위해 노즐 홀 직경이 비슷한 차이가 Sample 을 선택하였다. 시간에 따른 Penetration 형태는 VCO와 Mini SAC 간에 크게 차이가 나지 않음을 볼 수 있다. 그러나 분사초기 Penetration 에 있어 VCO 노즐이 Mini SAC 노즐 보다 큰 것으로 보아 Spray가 빠르게 발달한 것으로 보인다. 이것은 Fig.1 에서와 같이 VCO 노즐의 경우 연료가 SAC 를 통과하지 않고 분사가 이루어져 나타나는 것으로 보인다. Fig.6 의 계산 결과는 식(2),(3)의 비선형 식을 Runge-Kutta 방법을 사용하여 얻은 것으로 시험결과와 크게 차이가 나지 않고 있다. 이 식은 노즐 형상은 고

려되지 않고 노즐 홀 직경과  $C_d$  만이 고려되어 있다. 이 결과로 볼 때 거시적인 Penetration 은 VCO와 Mini SAC 형태 변화에 의해 크게 영향 받지 않는 것으로 판단된다.

$$\sum T = \frac{d}{dt} [ I \omega ] \quad (2)^2$$

$$\frac{X_i - X_{iw}}{X_i} = 0.35 \left[ \frac{X_{iw} Q_a}{d Q_i} \right]^{0.44} \quad (3)^2$$

### 3. 엔진시험 및 고찰

HSDI 디젤엔진의 성능은 Fig.7 과 같은 제약 조건에 의해 한정된다. 엔진 회전수가 일정 이상 넘으면 평균 피스톤 속도 증가로 인한 마찰내구한계와 분사기간 한계를 벗어나게 된다. 중속영역에서는 최대 토오르크를 얻기 위해 사이클당 연료량이 최대로 분사되어 연소실 압력이 내구한계에 도달한다. 연소실 압력과 함께 중저속이하에서는 공기유동이 충분치 않아 Smoke 에 의한 제약으로 토오르크 증가에 한계가 지어진다. 본 연구에서는 성능향상 측면에서 압력측정과 매연(Smoke)에 주안점을 두어 시험을 하였다.

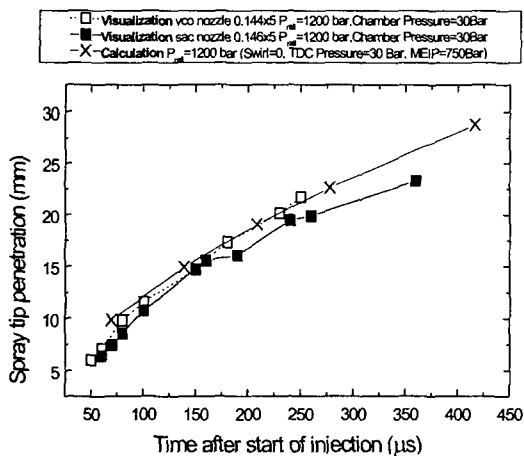


Fig. 6 Penetration in VCO and mini SAC nozzle

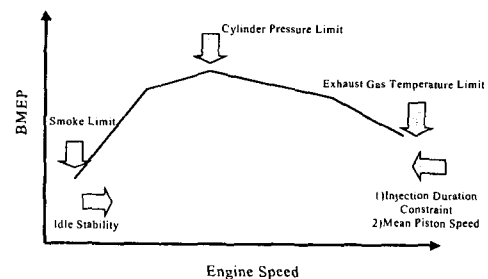


Fig. 7 Parameters for improving engine performance in HSDI diesel engine

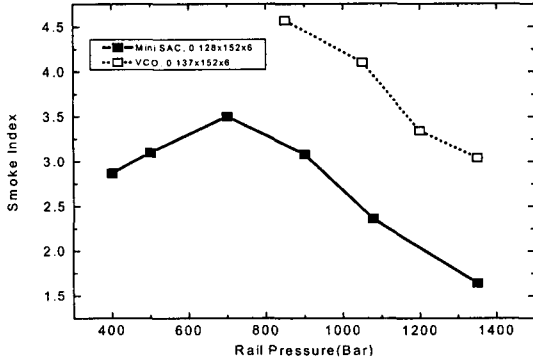


Fig. 8 Smoke with the change by VCO and mini SAC (2000 rpm, IMEP : 14 Bar, Combustion Chamber : TLS02 )

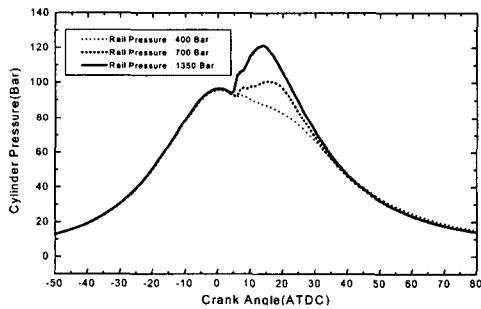


Fig. 9 Cylinder pressure with rail pressure (2000 rpm, IMEP : 14 Bar, Combustion Chamber : TLS02)

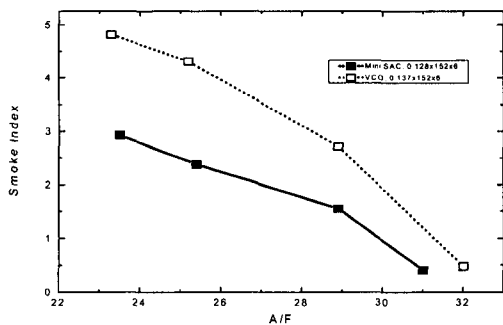


Fig. 10 Relationship between smoke and air fuel ratio with the change by VCO and Mini SAC(2000 rpm, Combustion Chamber : TLS02)

VCO 와 Mini SAC 노즐을 변경하며 Rail 압력에 따른 Smoke 를 측정 한 결과 Fig.8 과 같이 나타났다. 노즐 유압유량은 305cc/30s 으로 분사시간을 동일하게 유지되도록 하였기 때문에 VCO 노즐 홀 직경이 Mini SAC 노즐에 비해 크다. 매연은 레일(Rail)압력이 증가함에 따라 감소한다. 그러나 레일압력 800 Bar 보다 작게 되면 오히려 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 매연(Smoke)과 레일압력 사이의 거동은 VCO 와 Mini SAC 에서 동일하게 나타났고 매연은 VCO 가 Mini SAC 에 비해 높게 나와 성능 저하를 초래할 수 있음을 알 수 있다. 레일압력이 800 Bar 이하에서 매연이 감소하는 것은 Fig.9 에서 그 원인을 찾을 수 있다. 연소압력이 레일압력 감소에 따라 낮아지는 것을 볼 수 있다. 레일압력 700 Bar 에서는 1350 Bar 에 비해 연소압력이 급격히 낮아지고 400 Bar 가 되면 이것이 더욱 심해지는 것을 볼 수 있다. 이러한 점에서 볼 때 레일 압력이 800 Bar 이하에서 매연이 감소한 것은 착화가 되지않는 현상( Misfire )이 나타나며, 연소실 온도가 충분히 상승되지 않아 HC 로 배출되어 일어난 것으로 보인다.

공연비를 변경하며 시험한 결과는 Fig.10 과 같았다. 공연비가 증가함에 따라 매연이 감소하는 경향은 일치하지만 VCO 의 매연배출량이 Mini SAC 에 비해 높다. 공연비가 작아질수록 매연 차이는 커짐을 볼 수 있다. VCO 와 Mini SAC 노즐에 의한 연소특성을 분석하기 위해 연소압력을 비교하고 연소특성을 분석하였다.

Fig.11 은 크랭크 각에 따른 연소실 압력과 니들 리프트를 나타낸 것으로 동일 분사시기에서 측정된 것이다.

니들리프트를 보면 VCO 노즐의 경우가

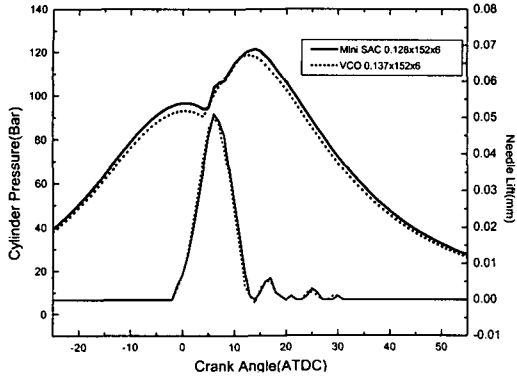


Fig. 11 Cylinder pressure and needle lift in VCO and mini SAC nozzle (2000 rpm, BMEP : 14 Bar combustion chamber : TLS02, Rail pressure : 1200 Bar)

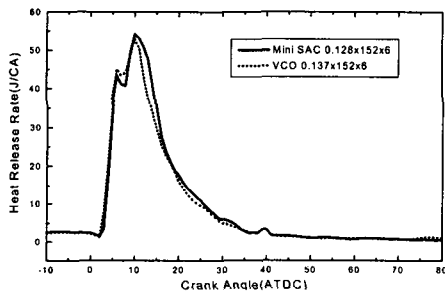


Fig. 12 Heat release rate in VCO and mini SAC nozzle (2000 rpm, IMEP : 14 Bar combustion chamber : TLS02, Rail pressure : 1200 Bar)

Mini SAC에 비해 빨리 상승하는 것을 볼 수 있다. 이러한 니들리프트 거동은 앞의 Fig.6의 Rig 시험 결과 일치한다. 연소실압력은 Mini SAC의 경우가 VCO에 비해 좀더 높게 상승했다. 이러한 연소압력 차이를 연소측면에서 이해하기 위해 열방출 (Heat Release)을 계산하였다.<sup>4)</sup>

Fig.12에 연소 초기 영역에서는 VCO 노즐의 경우가 니들이 일찍 열리며 연료 분사가 이루어져 열방출 상승도 Mini SAC에 비해

빠르다. 그러나 10 ATDC 이후에는 VCO인 경우가 Mini SAC에 비해 열방출이 작게 나타났다. 후반부 연소영역에서는 VCO 노즐이 장착된 경우에서 먼저 열방출 감소가 나타났다. 이것은 연료분사가 VCO인 경우에 먼저 시작되어 먼저 끝나서 후반부에 열방출의 하강도 Mini SAC에 비해 빠르게 나타난 것으로 보인다. 이것은 Fig.8의 결과와 불매 모순되는 것으로 보일 수 있다. 일반적으로 후반부에 분사되어 연소되는 연료는 연소실 압력 하강으로 매연이 되기 쉽다. 이와 함께 열방출량도 일반적으로 연료 분사율이 빠르면 크게 나타나는 것으로 알려져 있으나 Fig.12의 최고 열방출량은 연료 분사율이 낮은 Mini SAC인 경우가 높게 나타났다. 이러한 요인은 앞서 언급한  $C_d$  차이로 인한 분사노즐 홀 직경차와 깊은 관계가 있을 것으로 보인다. 분사노즐 홀 직경에 차이가 나면 연료분무에는 크게 두 가지 측면으로 영향을 미친다. 첫째는 노즐 직경이 작아지면 분사된 연료의 입자가 작아져 기화되기 쉽고 연료 액적의 단일 부피당 표면적 넓어져 공기와 연료혼합이 증진되어 연료연소를 개선시키고 매연을 줄일 수 있다. 둘째는 노즐 직경이 작을수록 연료 분사(Spray Penetration)가 작아져 시간에 따라 분사된 연료가 연소실 공간에 분포하는 것에 차이가 생겨나 공연비 분포가 달라지게 되어 연소특성이 바뀐다.<sup>1)</sup> 위의 두 가지 특성으로 나타나는 현상을 보다 깊이 이해하기 위해 연소실 형상이 다른 TLS01에서 VCO노즐의 거동을 살펴보았다.

Fig.13은 식(2),(3)에 의한 분사와 스웰 (Swirl)이 TLS01 조건에서는 스웰강도가 증가하고 연소실 반경을 기준으로 한 상대분사가 커진다. 이 결과를 통해 동일한 시간에

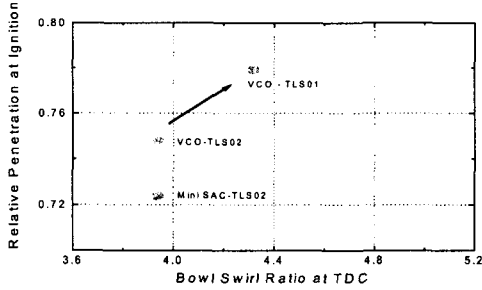


Fig. 13 Penetration and swirl with combustion chamber

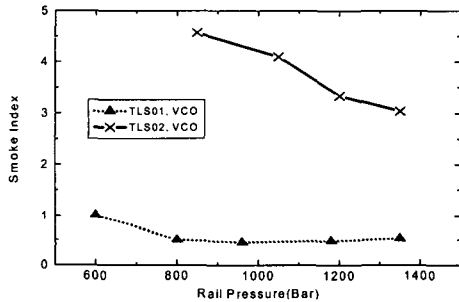


Fig. 14 Smoke with combustion chamber 2000 rpm, IMEP : 14 Bar)

분사된 연료가 연소실 벽면에 상대적으로 가까이 도달하고 공기유동 강도가 증가하여 연료가 공간적으로 보다 넓게 분포할 수 있음을 예상할 수 있다.

엔진시험결과는 Fig.14 에서와 같이 연소실이 TLS01 인 경우에 매연이 상당량 낮게 나타나 VCO 노즐인 경우는 Mini SAC 에 비해 연소실 내 공기유동을 증가시켜야 함을 확인할 수 있다. 이렇게 VCO 노즐에서 Mini SAC 에 비해 보다 높은 공기 유동이 필요한 것은 노즐 홀이 커져 연료의 미립화가 상대적으로 원활치 않은 것에 기인한 것으로 보인다.

#### 4. 결론

Small HSDI 디젤엔진을 대상으로 VCO 와 Mini SAC 노즐이 엔진 성능에 미치는 영향에 대해 연구한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) VCO 노즐은 Mini SAC 노즐에 비해 유량 계수가 약 18rP 작아 동일한 연료를 동일한 시간에 분사하기 위해서는 노즐 홀 직경이 약 4.2% 증가 되어야 한다.
- 2) 동일한 연소실 조건에서 VCO 노즐은 Mini SAC 노즐에 비해 매연(Smoke)이 높아 성능향상에 불리하다. 이는 연료 분사량을 동일하게 하기위해 홀 직경이 VCO 측이 크기 때문이다.
- 3) VCO 노즐에서 매연을 줄이기 위해서는 연소실 내 공기 유동인 스윙(Swirl)이 Mini SAC 에서 보다 강하게 하여야 한다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 류명석, “승용차용 HSDI 디젤엔진개발, G72 단계 1 차년도 보고서”, 2000.
- 2) 류명석, “승용차용 HSDI 디젤엔진개발, G7 1 단계 최종보고서”, 1999.
- 3) John B. Heywood, “Internal Combustion Engine Fundamentals”, Mcgraw-Hill, pp.491-566, pp.620-647, 1989.
- 4) 신범식 외, “Commonrail 을 사용한 소형디젤엔진의 연료분사 압력변화에 따른 성능 및 Smoke 저감에 미치는 영향 연구” 한국자동차공학회 춘계학술대회, 2000.
- 5) 전광민 외, “6 기통 압축착화기관의 단일 영역 열방출량 계산”, 한국자동차

- 공학회논문집 제 4 권 제 1 호, pp.147-154, 1996.
- 6) N. Hikosaka, "A View of the Future of Automotive Diesel Engines", SAE 972682, 1997.
- 7) C. S. Bae, J. S. Kang, "Diesel Spray Characteristics of Common-Rail VCO Nozzle Injector", Thiesel 2000.