

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0043

## VCO노즐에서 고압으로 분사되는 디젤분무의 특성

### Diesel Spray Development from VCO nozzles for High Pressure Direct-Injection

강진석\*, 배충식\*  
Jinsuk Kang, Choongsik Bae

#### ABSTRACT

Spray characteristics of diesel fuel injection is one of the most important factors in diesel combustion and pollutant emissions especially in HSDI (High Speed Direct Injection) diesel engines where the interval between the onset of combustion and the evaporation of atomized fuel is relatively short. An investigation into various spray characteristics from different holes of VCO(Valve Covered Orifice) nozzles was performed and its results were compared to standard sac nozzle. The global characteristics of spray, including spray angle, spray tip penetration, and spray pattern were measured from the spray images which were frozen by an instantaneous photography with a spark light source. For better understanding of spray behavior, SMD of the fuel sprays from multi hole nozzles were measured with back light imaging while the sprays from the other holes are covered by a purpose-built nozzle cap.

The investigation manifestly reveals the different spray patterns at the beginning of injection produced by VCO nozzles can be identified as three distinct types with their own macroscopic and microscopic characteristics, while macroscopic non-uniformity disappears at 0.9~1.0ms from the start of injection.

주요기술용어 : VCO Nozzle (VCO노즐), Spray Penetration (분무도달거리), Spray Angle (분무각), Spray Pattern (분무형태), SMD (평균분무입경)

#### 1. 서론

최근에 뛰어난 연료경제성 때문에 HSDI 디젤 엔진이 승용차용 엔진으로 개발되고 있으며 배기

가스를 저감하기 위하여 VCO(Valve Covered Orifice)노즐을 장착한 2-스프링 인젝터가 일반적으로 사용되고 있다. 착화지연기간동안 분사되는 연료량을 줄이면 예혼합 연소과정의 열방출을 낮출 수 있다. 따라서 소음과 NOx 배출을 저감할 수 있다. VCO노즐은 오리피스가 니들로 직접 가려지기 때문에, sac노즐처럼 분사 후에 노즐내부에 남아있던 연료가 연소실 안으로 흘러

\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

들어가서 HC 배출을 증가시키지 않는다.

VCO노즐을 장착한 2-스프링 인젝터가 HC와 NOx 배출을 저감시키는 반면 저부하 운전조건에서 스모크 배출을 증가시킨다는 결과가 보고된 바 있다.<sup>1)</sup> 이러한 스모크 배출 증가는 니들 리프트가 작은 경우 편심에 기인한 불균일한 분무의 형성 때문에 국부적으로 연료분포가 농후해지기 때문인 것으로 실험결과 밝혀졌다.<sup>2)</sup> 투명한 모형 VCO노즐을 이용한 연구결과 니들 리프트가 작은 경우 발생하는 불균일한 분무형성은 니들 끝부분의 편심과 Partial Hydraulic Flip(이하 PHF)때문이며, VCO노즐을 통해 나오는 분무는 3가지의 특징적인 형태로 분류할 수 있음이 제시되었다.<sup>3)</sup> 이들은 다공 sac노즐에서 분사되는 분무와 유사한 형태, 분무각이 큰 hollow cone형태, 그리고 PHF 때문에 분무각이 작고 아래방향으로 치우친 형태이다.

한번에 한 구멍에서 나오는 분무만 분사실 내부로 분사되도록 고안된 노즐 캡을 이용하여 VCO노즐의 각 구멍에서 형성된 분무의 특성을 파악하려는 일련의 시도가 행해졌으며<sup>4-6)</sup> Malvern 시스템을 이용하여 액적 크기를 측정 한 결과 분무의 중심에서 바깥쪽으로 나갈수록 SMD가 증가하였다.<sup>5,6)</sup>

최근에 유닛 인젝터와 common-rail 인젝터에 장착된 VCO노즐에서 분사되는 분무의 특성을 원거리에서 고배율을 얻을 수 있는 광학계를 이용하여 파악하는 연구가 행해졌다.<sup>7)</sup> 분무각의 변동을 포함하여 각 구멍별, 각 분사별 분무형태의 변동이 가시화 되었다.

본 연구의 목적은 니들 변위가 작은 경우의 분무형태에 주목하여 2-스프링 인젝터에 장착된 VCO노즐에서 분사되는 분무의 거시적인 특성을 측정하고 사진을 통하여 각 분무형태의 미시적 구조에 대한 이해의 폭을 넓히는데 있다.

## 2. 실험장치 구성 및 조건

분무실의 가압된 환경에 분사되는 VCO노즐

분무의 특성을 다양한 광학적 관찰을 통하여 파악하였다. 15kW급 모터와 귀환제어기를 사용하여 BOSCH VE펌프를 구동시켰으며 전부하 조건에서 순간적인 회전속도 변동이 데이터 획득 장치의 측정 오차 범위( $\pm 4\%$ ) 보다 작았고 한 회전당 속도변동은  $\pm 1\text{rpm}$  미만이었다. 분사기 후방의 고압관에 Piezo-resistive형 압력센서(KISTLER 4067A2000)를 장착하여 압력의 변동을 측정하였으며 2000 pulse/rev 로터리 엔코더(METRONIX H40)를 모터축에 장착하여 장치의 동기와 제어를 수행하였다. 실험에 사용된 VCO 노즐은 니들에 대한 각 구멍의 경사각이 모두 동일하며 spray cone angle이  $144^\circ$  이고 구멍의 지름은 0.17mm이다. 연료압이 220bar에 도달하면 니들이 움직이기 시작하며 약 300bar에 도달하면 2차 스프링이 압축되면서 본격적인 분사가 이루어진다.

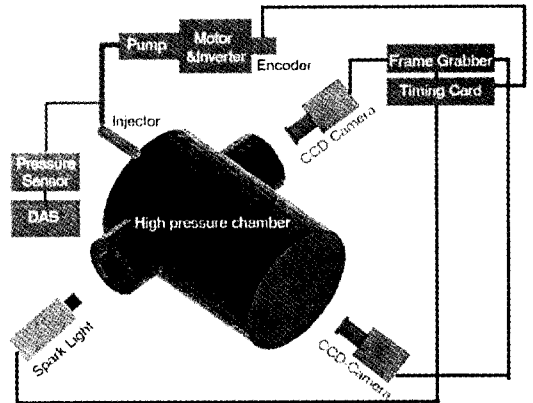


Fig. 1 Experimental setup for macroscopic and microscopic visualizations

광 지속시간이 100ns이하인 섬광원을 이용하여 분무의 미시적인 영상을 획득하였다. CCD를 통하여 획득된 순간 영상은 영상보드를 이용하여 PC에 저장하였다. 광학계의 확대율은 최고 5배 이상이었으며 획득된 영상의 실제크기와 초점면에 위치하는지를 파악하기 위하여 광학계를 보정하였다. Figure 1은 거시적, 미시적 분무 가시화를 위한 실험 장치를 나타낸다. 거시적 분무가시

화에서는 스트로보 광원과 마크로 렌즈를 사용하였다. 고압 분무실은 지름 80mm인 세 개의 원형창을 통하여 광학적인 접근이 가능하며 질소를 이용하여 최고 70bar까지 가압하였다.

Figure 2는 네 개의 서로 다른 부하조건에서 전형적인 고압연료관의 압력변동을 보여준다. 부하에 따른 특성이 나타나면서도 압력이 상승하는 시점과 상승률이 부하와 관계없이 일정한 속도인 엔진기준 1600 rpm을 실험조건으로 선정하였다.

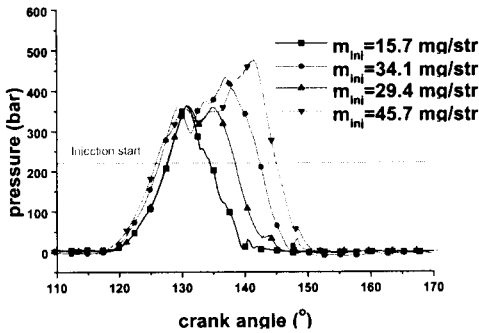


Fig. 2 Injection pressures at 1600 engine rpm

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 분무형태의 변동

임의의 속도와 부하조건에서 특정 구멍에서 분사되는 분무의 발달은 분사가 일어날 때마다 거시적 관점에서 볼 때 일정한 형태를 나타낸다. 그러나 특히 분무 발달 초기에 각 구멍별로 특정한 분무형태의 변동을 관찰할 수 있다.

거시적 영상을 통하여 sac노즐에서 분사되는 분무는 구멍의 위치와 무관하게 유사한 형태를 보이는 반면 VCO노즐에서 분사되는 분무는 세 가지의 형태로 구분됨을 알 수 있다. Figure 3은 이들 변위가 작은 경우 VCO노즐에서 각각 대기압, 15bar, 30bar로 가압된 분사실로 분사되는 분무의 전형적인 모습을 보여준다. 이 사진들로부터 분무 도달거리의 차이는 있지만 초기 분무

의 고유한 형태적 특징은 분사되는 환경의 밀도와 관계가 없음을 짐작할 수 있다. 초기 분무는 다공 sac노즐에서 분사되는 분무와 같은 형태 (5), 분무각이 크고 도달거리가 작은 형태 (1,4) 그리고 상대적으로 분무각과 분무도달거리가 작은 형태 (2,3)로 분류할 수 있으며 사진 a)의 비대칭적인 분무 (3)은 약한 스웰 분무가 PHF로 야기된 분무에게 추월 당하면서 생긴 것일 수 있으나 정확한 판단을 위해서 더 많은 연구가 필요하다.

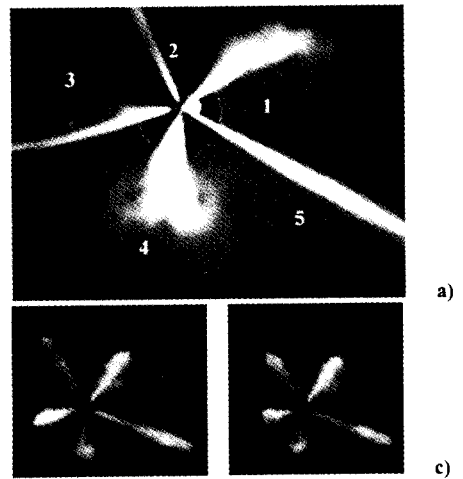


Fig. 3 Initial development of spray from VCO nozzle ( 0.1ms after start of injection )

a)  $\rho_{gas}=1.1kg/m^3$ , b)  $\rho_{gas}=16.9kg/m^3$ , c)  $\rho_{gas}=33.8kg/m^3$

분무 시작으로부터 착화지연시간 정도가 지난 대략 0.9~1.0ms후 VCO노즐의 각 구멍에서 분사된 분무들은 유사한 형태를 보이기 시작하며 이 시점은 고압분사관의 압력이 2차 스프링을 압축시킬만큼 상승하는데 걸리는 시간과 밀접한 관련이 있고 분사기 종류 및 부하 조건과 관계없이 거의 일정하다.

#### 3.2 분무각과 분무도달거리

Figure 4와 5는 각각 15bar와 30bar로 가압된 환경으로 분사되는 VCO노즐 분무의 분사개시 후 시간경과에 따른 분무도달거리를 보여준

다. 분사초기의 분무도달거리는 각 분무의 특징적인 형태와 밀접한 관련이 있으나 분사개시(SOI; Start of injection) 약 1ms 후부터는 비슷한 값으로 접근해감을 볼 수 있다. 특히 연소실의 체적이 작은 경우 불균일한 분무도달거리는 효과적인 공기 이용률에 불리하게 작용할 것으로 판단된다. Figure 5로부터 2차 스프레이가 압축된 후 빠른 속도로 분사된 연료가 초기에 분사된 연료를 따라잡게 됨을 알 수 있고 따라서 분무선단에서 합착에 의하여 큰 액적들이 생성되기 쉽다. 3번 구멍에서 분사되는 분무의 액적크기를 측정된 결과가 이러한 추론을 뒷받침 한다.(Fig.13 참조)

Figure 6은 분사실의 압력과 분무도달거리의 관계를 보여준다. 각 구멍에서 분사되는 분무의 분무도달거리는 각 조건에서 비교적 균일한 값을 보이고 있다. 분사실의 질소가스가 50bar까지 가압 되었을 때 분무도달거리는 15bar로 가압 되었을 때에 비하여 50%이상 감소하였다. 실험결과와 난류 개스 제트 이론에 근거한 많은 관계식들 중에서 Hiroyasu 등[8]과 Dent[9]에 의해서 아래와 같이 제시된 관계식 (1)-(3)을 적용하여 실험결과와 비교하였다.

2차 스프레이가 압축된 후의 분무 도달거리는 Fig. 4와 5에서 보는 바와 같이 제시된 관계식이 분사압력 변동에 따라 형성하는 영역 내에서 비교적 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 분사기간 동안 분사압력이 계속 변화하기 때문에 그래프상의 상한선과 하한선은 고압연료관에서 측정된 최대, 최소 압력에서 분무 도달거리를 제시된 관계식으로 예측한 것이다. 분사실 압력이 40bar인 경우 관계식은 실제 분무도달거리보다 더 큰 값을 보였다. VCO노즐의 분무도달거리를 더 정확히 예측하기 위해서는 압력 및 유량계수의 변동을 포함하여 연료 분출구멍의 비정상 유동특성을 파악하는 것이 필요하다.

$$S = 0.39 \left( \frac{2\Delta P}{\rho_l} \right)^{1/2} t \quad t < t_{break} \quad (1)$$

$$S = 2.95 \left( \frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{1/4} (d_o t)^{1/2} \quad t > t_{break} \quad (2)$$

$$\text{where } t_{break} = \frac{29 \rho_l d_o}{\left( \frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{1/2}}$$

By Hiroyasu et al. 8)

$$S = 3.07 \left( \frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{1/4} (t d_o)^{1/2} \left( \frac{294}{T_g} \right)^{1/4} \quad (3)$$

By Dent 9)

- S : spray tip penetration
- $\rho_p$  : pressure drop across the nozzle
- t : time after the start of injection
- $\rho_l$  : liquid density
- $\rho_g$  : gas density
- $d_o$  : nozzle diameter
- $T_g$  : gas temperature

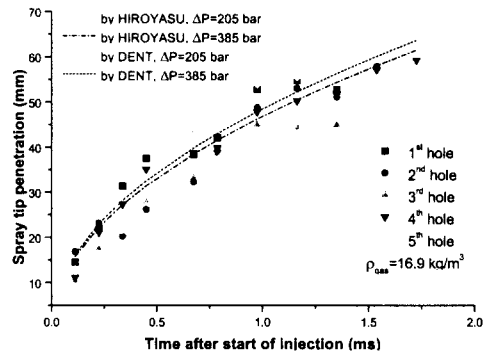


Fig. 4 Spray tip penetration from each hole under pressurized condition at 15bar ( 1600 eng. rpm,  $m_{inj}$ =15.7mg/str,  $T_{fuel}$ =30°C,  $P_{chamber}$ =15bar,  $\rho_{gas}$ =16.9kg/m<sup>3</sup> )

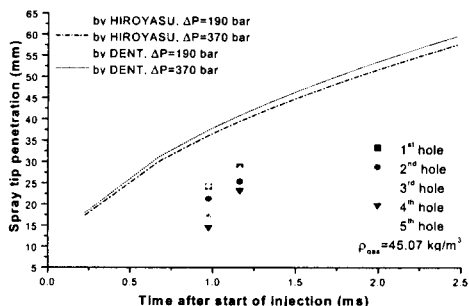


Fig. 5 Spray tip penetration from each hole under pressurized condition at 30bar ( 1600 eng. rpm,  $m_{inj}=15.7\text{mg/str}$ ,  $T_{fuel}=30^\circ\text{C}$ ,  $P_{chamber}=30\text{bar}$ ,  $\rho_{gas}=33.8\text{kg/m}^3$  )

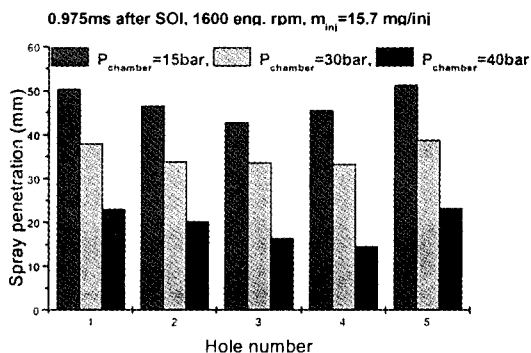


Fig. 6 Spray tip penetrations, regarding chamber pressure at 0.0975ms after start of injection ( 1600 eng. rpm,  $m_{inj}=15.7\text{mg/str}$ ,  $T_{fuel}=30^\circ\text{C}$  )

Figures 7과 8은 분사개시 후 시간 경과와 분사실 압력에 따른 각 분무형태의 분무각 변화를 보여준다. 분사초기에는 분무도달거리처럼 분무각도 구멍별로 상당히 다르다. 하지만 시간이 경과해가면서 차이가 적어짐을 알 수 있다. 임의의 형태 분무에 대하여 분사실 압력이 높아질수록 분무각이 커지는 현상을 관찰하였다. 일반적으로 제트가 발달하는 영역에서는 분무각이 시간에 따라서 감소하다가 분영역에서는 일정한 값으로 수렴해가며 후방 압력이 크고, 오리피스 전후의 압

력강하가 크며, 오리피스의 단면적이 클수록 큰 분무각을 얻게된다는 사실이 잘 알려져 있다.<sup>10)</sup> 이러한 경향은 난류제트 거동의 유추나 차원해석을 통해서 얻을 수 있는데 분무와 주변환경에 있는 기체의 상호작용이 분무각의 결정에 중요하다는 사실을 내포하고 있다. 그러나 VCO노즐의 내부 유동특성도 중요한 영향을 미친다. Kim 등<sup>11)</sup>은 VCO노즐 모형을 통하여 분무의 퍼짐각이 이들의 위치가 일정함에도 불구하고 연료분출구의 cavitation특성 때문에 시간이 경과함에 따라 증가함을 보였으며 Soteriou 등<sup>3)</sup>은 VCO노즐의 분무특성들을 내부 유동의 특징에 따라서 분류하였다.

미시적인 가시화를 통하여 Fig. 3의 5번 분무는 다공 sac노즐의 분무와 유사한 형태이며 분사 시간동안 고유한 형태가 유지되는 것으로 밝혀졌다. 이 분무의 분무각이 일정한 값에 도달했을 때 다음과 같은 식으로 잘 나타낼 수 있었다. Hiroyasu 등[8]은 이 식 (4)에서 밀도비의 지수를 0.26으로 발표한 바 있다.

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = 0.356 \left(\frac{\rho_a}{\rho_g}\right)^{0.25} \quad (4)$$

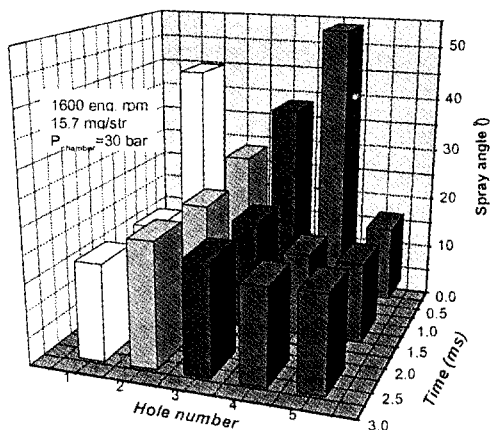


Fig. 7 Spray angles of each hole as a function of time from start of injection at  $P_{chamber}=30\text{bar}$  (1600 eng. rpm,  $m_{inj}=15.7\text{mg/str}$ ,  $T_{fuel}=30^\circ\text{C}$ )

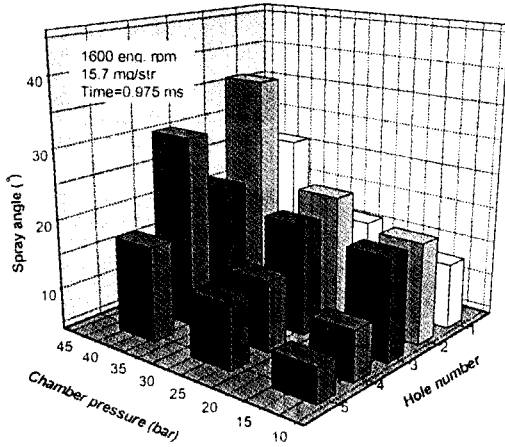


Fig. 8 Spray angles depending on initial spray patterns and chamber pressure at 0.975ms after start of injection  
( 1600 eng. rpm,  $m_{inj}=15.7\text{mg/str}$ ,  $T_{fuel}=30^{\circ}\text{C}$ )

### 3.3 VCO노즐 분무의 미시적 특성

본 연구에서는 VCO노즐 각 분무의 특징이 가장 잘 나타나도록 대기압 환경에 분사하면서 구멍근처에서 확대된 분무영상을 획득하였다. Cavitation 때문에 야기되는 분무의 특성은 실제 엔진의 운전조건과 달라질 수 있다. 그러나 거시적 관점에서 분사초기의 분무 형태는 앞에서 살펴본 바와 같이 분무실의 압력과 무관하였다.

#### 3.3.1 니들 변위가 작은 경우 다공 sac노즐의 분무와 유사한 형태의 분무

Figure 9는 구멍근처에서 분무의 형태를 보여준다. 이 분무의 형태는 분사기간동안 변하지 않았으며 구멍으로부터 약 직경정도(0.2mm) 떨어진 분무의 바깥쪽 경계에서 형클어진 분무의 구조가 나타나기 시작하였다.

#### 3.3.2 니들 변위가 작은 경우 분무각이 크고 분무 도달거리가 작은 분무

Figure 10은 분무각이 크고 도달거리가 작은 분무를 (Fig. 3의 1,4에 해당)보이는데 a)와 b)

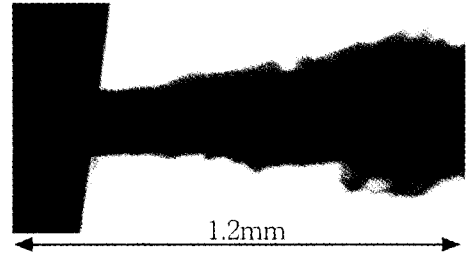


Fig. 9 Spray similar to one produced by sac nozzle (1600 eng. rpm,  $m_{inj}=29.4\text{mg/str}$ , 0.2ms after start of injection, ambient pressure)

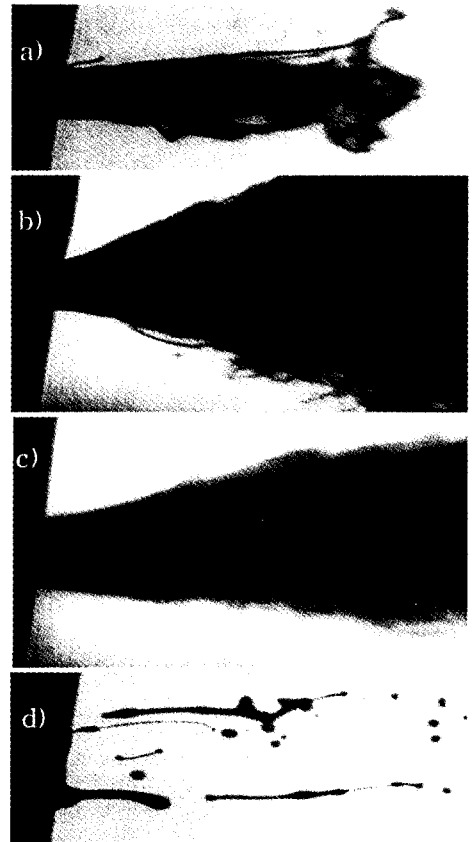


Fig. 10 Development of the spray from the hole, where the spray of wide angle and small penetration are produced at low needle lift condition (1600 eng. rpm,  $m_{inj}=29.4\text{mg/str}$ )  
a) start of injection    b) 0.2ms later,  
c) 0.7ms later        d) end of injection

는 표면이 액사들로 얽혀있는 구조의 hollow cone형태로 보인다. 분사개시로부터 대략 0.7ms 경과 후부터는 Fig. 9에서 보이는 것과 같은 sac 노즐 분무와 유사한 형태가 나타나서 분사가 끝날 때까지 지속된다. 분사말기에는 액사들이 수십 마이크로미터의 큰 액적들로 끊어짐을 볼 수 있다. 이러한 분사말기의 현상은 VCO 노즐의 3가지 분무형태에서 공통적으로 관찰할 수 있었다. 노즐 구멍으로부터 25mm후방에서 획득한 분무의 미시적 영상을 통하여 액적의 크기를 측정하였다. 광학적 접근이 어려워서 충분한 데이터를 획득하기는 어려웠지만 적어도 Fig. 11은 hollow cone형태의 분무가 뒤이어 나오는 sac노즐 분무형태의 분무보다 큰 액적을 형성함을 보여준다. 초기에 형성된 커다란 액적들이 상대적으로 느린 속도로 바깥쪽으로 이동하면서 뒤따라 분사되는 sac노즐 분무형태의 분무를 감싸는 것으로 보인다.

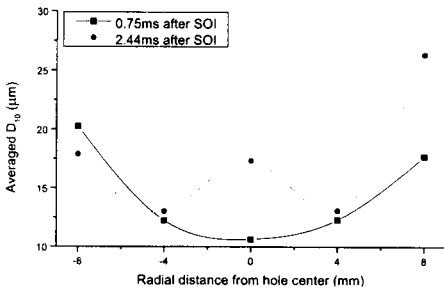


Fig. 11 Particle size of spray of wide angle and small penetration at low needle lift (1600 eng. rpm, minj=29.4mg/str, 25mm from the hole)

### 3.3.3 니들변위가 작은 경우 분무각이 작고 분무도달거리가 작은 분무

Figure 12는 분무각이 작고 도달거리도 작은 분무 (Fig. 3의 2,3에 해당)에 대하여 노즐의 구멍 5mm후방에서 획득한 영상으로 액사들의 결합이 풀어지는 것처럼 보이며 액적들이 주변에 존재하고 있다. 분무가 아직 완전히 미립화 되지 않았으며 액적들이 액사들로부터 형성되고 있는



Fig. 12 Spray from the hole where the spray of small angle and small penetration was produced at low needle lift condition (1600 eng. rpm, minj=29.4mg/str, 1.1ms after injection start, 5mm from the hole exit)

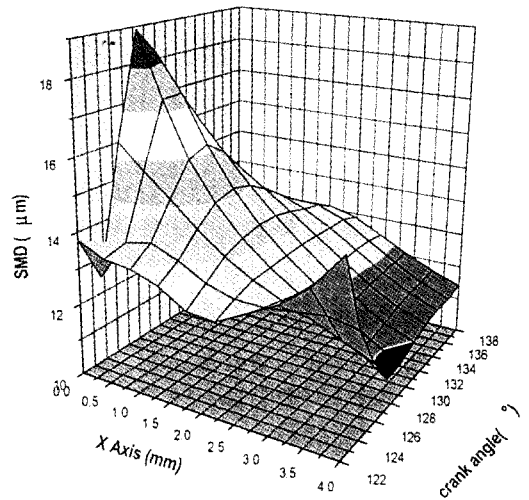


Fig. 13 SMD distribution of the spray which has small angle and small penetration at low needle lift condition (1600 eng. rpm, minj=45.7mg/str, 40mm behind the hole, X is radial distance from hole center as shown in Fig.11)

것으로 판단되나 이 사진으로부터 정확한 구조를 파악하기는 어렵다. 이러한 초기 분무형태를 갖는 분무의 SMD를 구멍 40mm후방에서 측정할 결과 Fig. 13과 같은 결과를 얻었다. 10-20μm 정도의 액적들이 분포하고 있으며 가장 큰 SMD와 질량분포는 분무선단이 측정점을 지나갈 때 나타났다. 초기에 작은 속도를 가지고 분사된 분무가 뒤이어 같은 구멍에서 분사되는 상대적으로 높은

속도의 다공 sac노즐에서 분사되는 분무와 유사한 형태의 분무에게 추월 당하게 된다. 이 과정에서 합착에 의해 분무선단에 상대적으로 큰 입자들이 생성되며 분무의 바깥쪽 경계에서는 주변 기체와의 상호작용으로 2차미립화가 일어나서 상대적으로 작은 입자들이 분포하게 된다.

#### 4. 결론

2-스프링 인젝터에 장착된 VCO노즐로부터 분사되는 분무의 특성을 거시적, 미시적 영상을 통해서 연구하였다. 본 연구의 주 목적은 특히 니들의 변위가 작은 경우, 불균일한 형태의 분무특성들을 파악하고 이들이 공기 이용율에 미치는 영향을 유추하는데 있다. 결과는 다음과 같이 정리 된다.

- 1) 니들의 변위가 작은 경우 VCO 노즐에서 분사되는 분무는 불균일하며 형태적 특징에 따라서 3가지로 분류할 수 있다. 이들은 다공 sac노즐의 전형적인 분무형태를 갖는 분무, 분무각이 큰 hollow cone 분무, 그리고 상대적으로 분사각과 분무도달거리가 작은 분무이다.
- 2) VCO 노즐에서 분사되는 분무의 형태적 특징은 노즐 전, 후방의 압력과 무관하다.
- 3) 분사개시 약 1.0ms를 전후하여 분무의 불균일성이 사라지게되며 모든 구멍에서 분사되는 분무들이 다공 sac노즐에서 분사되는 전형적인 분무의 형태를 갖게된다.
- 4) 모든 분무의 분사말기에 액사들이 수십 마이크로미터정도의 큰 액적들을 형성한다.
- 5) 니들 변위가 작은 경우에 큰 분무각과 작은 분무도달거리를 갖는 분무는 표면이 액사로 얽혀있는 hollow cone분무의 형태이다.
- 6) Hollow cone분무는 다른 형태의 분무에 비해서 큰 액적을 형성하며 같은 구멍에서 뒤이어 분사되는 분무의 주위를 감싼다.
- 7) 2차 스프링이 압축되면서 상대적으로 빠른속도로 분사된 연료들은 초기에 작은 속도로 분사된 분무를 추월하면서 합착에 의해서 큰 액

적을 형성한다.

#### 후 기

이 연구는 G7 차세대자동차기술개발의 연구비 지원에 의해 수행된 결과입니다. 관계자 여러분께 감사드리며 특히 현대자동차의 이항경 박사과 신범식 대리의 기술지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) GREEVES, G., WANG, C. H. T., Two Stage Injection and HSDI Combustion, SAE 905025,1990.
- 2) IYAMA, A., MASUMOTO, Y., KAWAMOTO, K., and OHISHI, T., Spray Formation Improvement of a VCO Nozzle for DI Diesel Smoke Reduction, ImechE Seminar Diesel Fuel Injection System, 1992.
- 3) SOTERIOU, C., ANDREWS, R., SMITH, M., Direct Injection Diesel Sprays and the Effect of Cavitation and Hydraulic Flip on Atomization, SAE 950080, 1995.
- 4) CAMPANELLA, R., LAFORGIA, D., FICARELLA, A., DAMIANI, V., Spray Characteristics of Five-Hole V.C.O Nozzles of a Diesel Electro-Injector, SAE 940192, 1994.
- 5) DI GIORGIO, F., LAFORGIA, D., DAMIANI, V., Investigation of Drop Size Distribution in the Spray of Five-Hole VCO nozzle at High Feeding Pressure, SAE 950087, 1995.
- 6) FICARELLA, A., LAFORGIA, D., STARACE, G., DAMIANI, V., Experimental Investigation of the Spray of an Axi-Symmetric Nozzle of a Common-rail High Pressure Electro-Injector, SAE970054, 1997.



- 7) LAI, M. C., WANG, T. DAMIANI, V., C. T., XIE, X., HAN, J. S., HENEIN, N., SCHWARZ, E., and BRYZIK, W., Microscopic Characterization of Diesel Sprays at VCO Nozzle Exit, SAE 982542, 1998.
- 8) HIROYASU, H., ARAI, M., Structure of Fuel Sprays in Diesel Engines, SAE900475, 1990.
- 9) DENT, J.C., Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for Studying Spray Penetration, SAE710571, 1971.
- 10) BAYVEL, L., ORZECOWSKI, Z., Liquid Atomization, Taylor and Francis, 1993.
- 11) KIM, J. H., NISHIDA, K., YOSHIZAKI, T., HIROYASU, H., Characterization of Flows in the Sac Chamber and the Discharge Hole of a D.I. Diesel Injection Nozzle by Using a Transparent Model Nozzle, SAE 972942, 1997.
- 12) FATH, A., MÜNCH, K.-U., LEIPERTZ, A., Spray Break-Up Process of Diesel Fuel Investigated Close to the Nozzle, Proceedings of ICLASS-97, pp.513-520, 1997.