

# 인가전압이 디젤 피에조 인젝터의 분무 특성에 미치는 영향

이진우·배충식\*

한국과학기술원 기계공학과

## Effect of Induced Voltage on Spray Characteristics of Piezo Actuated Diesel Injector

Jinwoo Lee · Choongsik Bae\*

Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea  
(Received 14 October 2009 / Accepted 17 December 2009)

**Abstract** : A piezo-driven injector was applied with a purpose to evaluate the effect of induced voltage on spray characteristics. For this, injection rate, macroscopic imaging, ambient gas entrainment and particle sizing were carried out. It was shown that initial slope of injection rate was steeper as induced voltage increased, while slope of injection rate became mostly constant with fully opened needle. From macroscopic imaging, longer spray tip penetration was produced with higher induced voltage. Moreover, wider spray angle was detected in the early stage of spray development, when higher induced voltage was applied. Ambient air entrainment rate was increased and particle size was reduced with higher induced voltage.

**Key words** : Piezo-actuated injector(피에조 인젝터), Injection rate(분사율), Macroscopic images(거시적이미지), Ambient gas entrainment rate(주변공기유입율), Droplet size(입자크기)

### Nomenclature

HFR : hydraulic flow rate, cc/30s  
P<sub>inj</sub> : injection pressure, bar  
P<sub>amb</sub> : ambient pressure, bar

### 1. 서론

직접 분사식 디젤엔진에서 연소의 효율을 향상시키고, 유해 배기가스를 저감하기 위해서는 연료의 분사율, 분무의 거시적 형태, 그리고 분무의 미립화 특성을 최적화시키기 위한 연구가 요구된다.<sup>1)</sup> 특히, 최근 더욱 강화되고 있는 PM과 NOx 규제에 대응하기 위해서는 기존에 비해 더 높은 고압의 연료

분사와 더 많은 횡수의 다단 분사가 요구된다. 현재 많이 이용되고 있는 솔레노이드 타입의 인젝터는 이런 요구 사항을 실현하기에 한계가 있다. 따라서 최근 새로운 구동방식을 지니는 피에조 인젝터가 소개되고 있으며, 관련 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>2)</sup> 피에조 인젝터는 구동 전류 응답 시간이 솔레노이드 인젝터에 비해 빠르기 때문에 다단 분사를 위한 제어성과 응답성 측면에서 유리한 것으로 알려져 있다.<sup>3)</sup> 피에조 인젝터의 응답속도가 빠른 이유는 기존 서보 기구(servo mechanism)를 이용하는 솔레노이드 인젝터와는 달리 Fig. 1(a)와 같이 피에조 스택(piezo stack)의 움직임이 니들의 움직임으로 직접 반영(direct actuation)되기 때문이다.<sup>3)</sup> 피에조 스택은 전하를 축적하는 것을 목적으로 하여 만들어진 충전 용량성 소자인 축전기(condenser)에 해당된

\*Corresponding author, E-mail: csbae@kaist.ac.kr

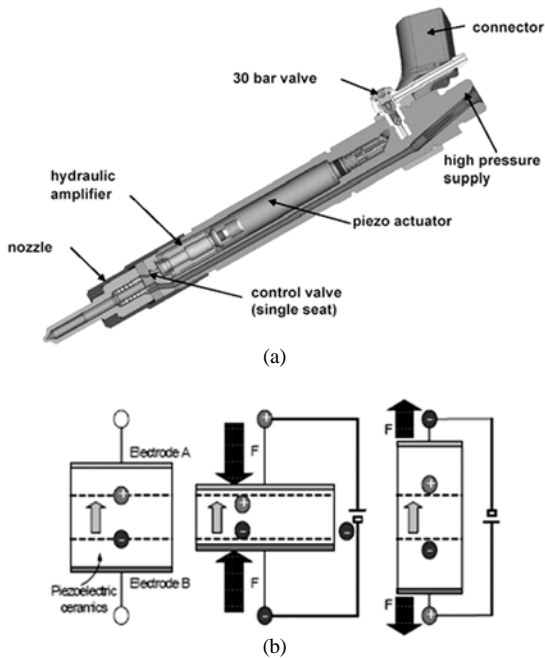


Fig. 1 Schematic diagram of piezo actuated injector (a) and inverse piezoelectric effect (b)

다. Fig. 1(b)와 같이 축전기에 직류 전압을 인가하면 각 전극에는 걸린 전압의 극성에 따라 그리고 그 전압과 정전기 용량(capacitance)에 비례하여, 전하가 거의 순간적으로 축적되게 된다.<sup>4)</sup> 피에조 스택에 인가된 전압에 따라 스택의 길이가 변하는 역 압전효과(inverse piezoelectric effect)를 이용하고 있는데, 실제 적용형 압전 소자(PZT) 스택 액츄에이터의 변위는 식 (1)과 같다.<sup>5,6)</sup>

$$\Delta L \approx d_{33} \cdot N_p \cdot U \quad (1)$$

- $\Delta L$  : 피에조스택의 변위
- $d_{33}$  : 변형율 계수 (m/V)
- $N_p$  : 세라믹소자의 층수
- $U$  : 인가전압 (V)

위 식에서 볼 수 있듯이 피에조 스택의 변위는 인가전압에 비례하는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 다양한 인가전압을 적용하였을 때 분사율, 거시적 이미지, 주변공기유입속도, 입자크기의 분무 특성을 파악함으로써 향후 피에조 인젝터의 엔진 적용 시의 기초데이터를 얻고자 하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험 조건

### 2.1 실험 장치

#### 2.1.1 거시적 분무 계측 실험 장치

분무가시화를 위해 구성된 실험장치는 Fig. 2와 같다. ECU를 통하여 피에조 인젝터의 분사를 제어하였으며, 가시영역의 직경이 80 mm인 강화유리창이 장착된 고압 분무실에서 Mie 산란(Mie scattering)법을 이용하여 분무의 거시적 형태를 촬영하였다. 분무의 거시적 발달 모습을 가시화하기 위하여 스트로보(strobo) 광원(EG&G Optoelectronics, MVS-2601-CE96)과 영상획득장치(PCO CCD Imaging, SensiCam)를 이용하였다.

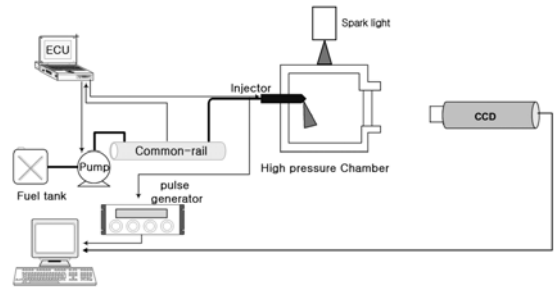


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for spray visualization

#### 2.1.2 PDA 실험 장치

Fig. 3은 PDA(Phase Doppler Anemometry) 실험 장치를 보여준다. 분무입자가 측정영역을 통과하여 움직일 때 입자에 의해 레이저 빔이 산란되며, 산란에 의한 신호가 레이저 빔과 30°의 각도를 이루는 수광 렌즈(receiving lens)를 통해 탐지기(photodetector)로 전달된다. 이 때 전달된 도플러 신호(doppler burst signal)의 주파수는 입자의 속도에 비례하게 되며, 두 개의 탐지기에 전달되는 신호의 위상차는 입자의 직경에 비례하게 된다. 이를 이용하여 공기유입 속도(air-entrainment velocity)와 입자크기(droplet size)를 측정하였다. 주변공기유입속도 측정 지점은 Fig. 4(a)에 도식화하였다. 분무의 끝단 경계에서 5 mm 떨어진 지점을 제어표면으로 결정하였다. 측정 지점은 노즐 팁으로부터 10, 20, 30, 40, 50 mm 떨어진 지점으로 정하였다. Fig. 4(b)에 나타낸 바와 같이 입자크기 측정 지점은 분무의 중심축을 따라 노즐

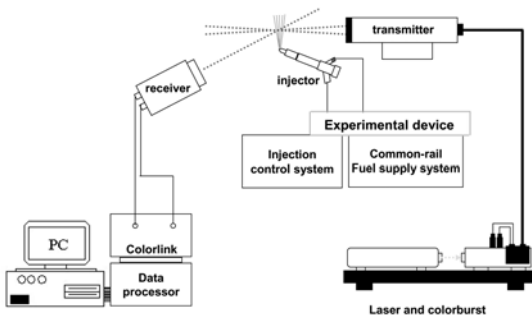


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup for PDA

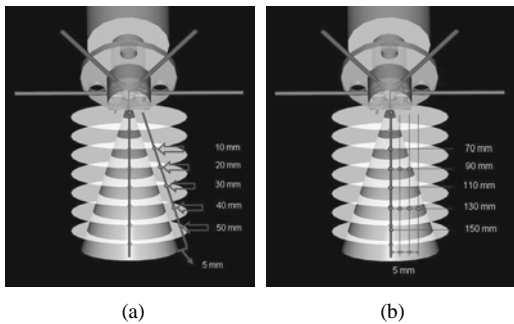


Fig. 4 Measuring points used to evaluate (a) the ambient gas entrainment into the spray and (b) particle size

팁으로부터 거리가 70 mm인 지점부터 20 mm 씩 증가시켜 측정했다. 또한 분무의 중심축으로부터 반경방향으로 변화 시의 입자크기를 측정하였다.

## 2.2 실험 조건

인가전압에 따른 피에조 인젝터의 분무 특성을 파악하기 위한 실험 조건은 아래 Table 1과 같다. 6 홀, 분사각 153°, HFR 360인 피에조 인젝터를 사용하였다. 분사압력은 520, 1040 bar, 분위기 압력은 15, 30 bar, 분사량은 60 mm<sup>3</sup>로 고정하였다. 인가전압은 92 V에서 112 V 까지 5 V씩 증가시키면서 실험하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1 인가전압이 분사율에 미치는 영향

Fig. 5는 분사압 520, 1040 bar, 분위기 압력 15 bar 조건에서 인가전압을 92, 97, 102, 107, 112 V로 상승시켰을 때의 분사율 형상을 보여준다. 분사압 상승에 따른 분사율 형상의 변화는 거의 없는 것을

Table 1 Experimental conditions

Specification of injector	Type	# of hole	Inj. Angle (°)	HFR (cc/30s)
	Piezo type	6	153	360
Inj. pressure [bar]	520, 1040			
Back Pressure [bar]	15, 30			
Induced voltage [V]	92, 97, 102, 107, 112			
Fuel injection quantity [mm <sup>3</sup> ]	60			

\*HFR (Hydraulic Flow Rate) : flow rate at 100 bar during 30 s

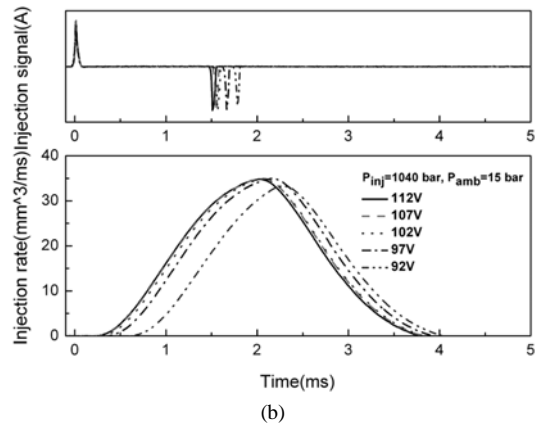
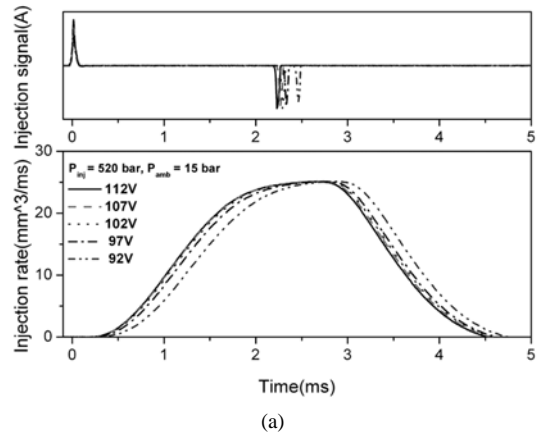


Fig. 5 Effect of induced voltage with injection pressure and ambient pressure on injection rate; ((a)  $P_{inj} = 520$  bar,  $P_{amb} = 15$  bar, (b)  $P_{inj} = 1040$  bar,  $P_{amb} = 15$  bar)

확인할 수 있다. 하지만 인가전압이 92, 97 V로 낮은 조건에서 인가전압이 102, 107, 112 V인 경우에 비해 분사 신호인가 부터 실제 분사가 이루어지기 까지 걸리는 시간이 길어짐을 알 수 있다. 이는 피에조 인젝터에서 니들의 움직임이 피에조 스택의

변위에 의해 결정되기 때문에, 인가전압이 낮을수록 동일 시간 기준으로 피에조 스택의 변위 량, 즉 피에조 스택의 움직임의 변화 속도가 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 인가전압이 높아짐에 따라 분사 초기 구간 동안 분사울 곡선의 기울기가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 인가전압 상승으로 피에조 스택의 움직임의 속도가 증가하게 되고 이는 곧, 니들의 움직임의 속도를 증가시켜 동일 시간대에서 인가전압이 높은 경우에 상대적으로 유량 확보가 유리해 졌기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 분사초기구간을 벗어난 영역에서부터는 인가전압에 관계없이 분사울 곡선의 기울기가 동일한 것을 확인할 수 있다. 이는 동일 사양의 노즐을 가진 인젝터를 이용하여 실험을 하였기 때문에 니들이 완전히 열리게 된 후 부터는 인가전압에 관계없이 노즐의 형상과 분사압에 의해서만 유량이 결정되기 때문이다.

### 3.2 인가전압이 거시적 분무형태에 미치는 영향

인가전압에 따른 니들 거동의 변화에 따라 분사 초기구간에 분사울 형상에 나타난 차이가 분무의 거시적 형태에 미치는 영향을 확인하기 위해 거시적 분무 이미지를 분석하였다.

Fig. 6은 분사압 520 bar, 분위기 압력 15 bar에서

인가전압을 92에서 112 V까지 변화시켰을 때의 거시적 분무 이미지를 보여준다. 인가전압이 커짐에 따라 분사 후 동일 동일 시간에서 분무도달거리가 더 길며, 분무각 역시 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 인가전압이 102, 107, 112 V인 경우 분사울 형상에서와 같이 분무발달에 큰 차이가 없었다.

#### 3.2.1 분무도달거리(spray tip penetration)

Fig. 7(a)는 분사압 520 bar, 분위기압 15 bar에서 인가전압에 따른 분무도달거리를 보여준다. 분무도달거리는 인가전압이 높아짐에 따라 동일 시점에서 더 멀리 진행됨을 확인할 수 있다. 특히, 분사 초기 구간(Fig. 7(b))을 확대하여 보았을 때 분무선단도달거리의 증가량, 즉 기울기 값이 인가전압에 비례하여 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한 분사 초기 구간을 벗어난 지점부터는 분무도달거리의 증가량 값이 거의 일정한 것을 확인할 수 있다. 이는 분사 초기 구간에서는 인가전압의 상승으로 피에조 스택의 움직임의 속도가 증가하게 되고, 이는 곧 니들 움직임의 속도를 증가시켜 동일 시간대에서 인가전압이 높은 경우에 유량의 확보에 유리해지며 더 큰 유량을 지니는 연료가 동일한 노즐을 통과하기 때문에 상대적으로 분사속도가 증가한 것으로 판단된다. 이는 분사 초기 구간에서는 분무도달거리에 있어서 분사압 보다 인가전압이 더 중요한 제어인자가 됨

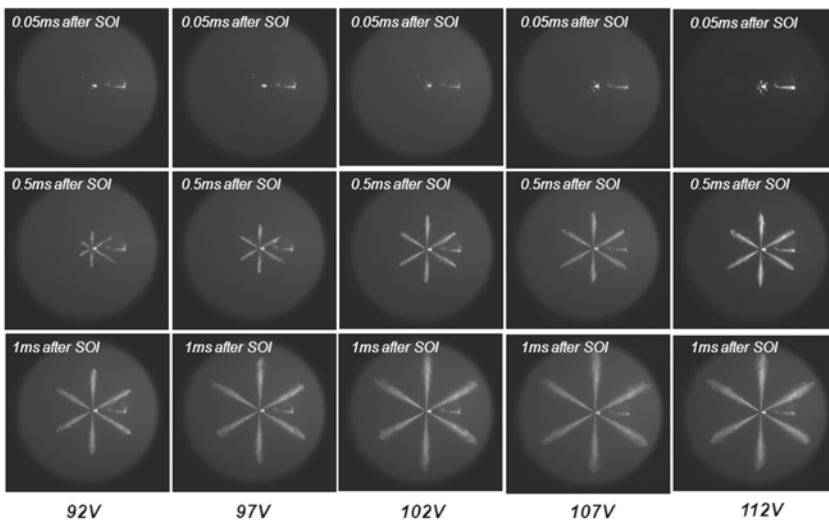
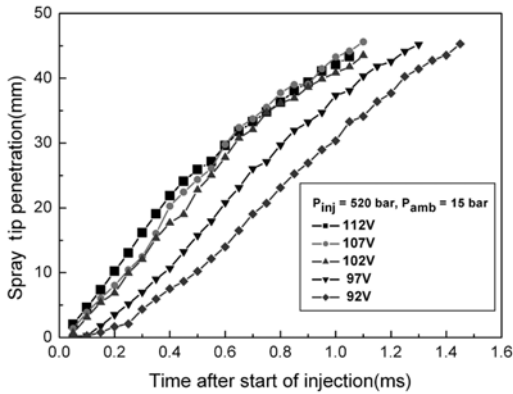
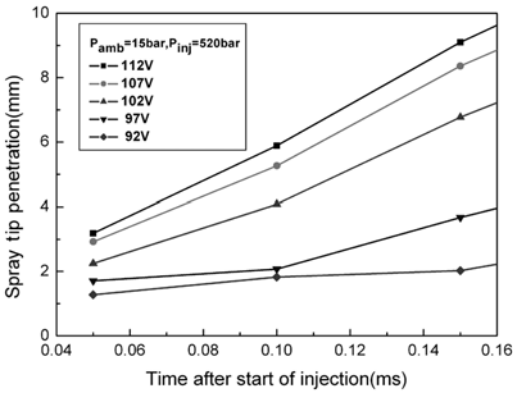


Fig. 6 Spray shape for  $P_{inj} = 520$  bar,  $P_{amb} = 15$  bar with various induced voltage



(a)



(b)

Fig. 7 Spray tip penetration for  $P_{inj} = 520$  bar,  $P_{amb} = 15$  bar with various induced voltage ((a): overall spray tip penetration, (b): magnified spray tip penetration)

을 보여준다. 또한 니들이 완전히 열린 이후의 분사 속도는 분사압 만의 영향을 받기 때문에 인가전압에 관계없이 분무도달거리의 증가량 값이 일정한 것으로 판단된다.

### 3.2.2 분무각

Fig. 8은 분사압 520 bar, 분위기 압력 15 bar에서 인가전압에 따른 분무각을 보여준다. 인가전압이 증가함에 따라 분사 초기 분무각이 상대적으로 커지는 것을 알 수 있다. 일반적으로 분무 발달의 초기 과정에서 분무는 분무 전단부 주변에 발달되는 난류 경계 층(turbulent boundary layer)이 급속도로 발달되는 머쉬룸 포텐셜 코어(mushroom potential core)를 가지며, 이로 인해 분사 초기 구간에 분무각이 커지는 것으로 알려져 있다.<sup>7)</sup> 따라서 인가전압이 증가

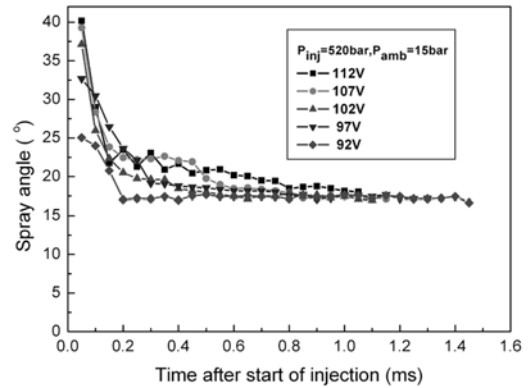
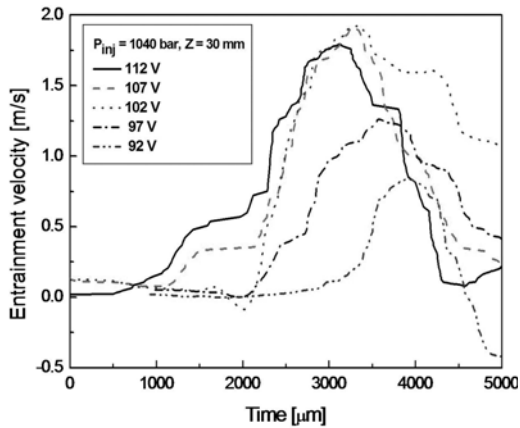


Fig. 8 Spray angle for  $P_{inj} = 520$  bar,  $P_{amb} = 15$  bar with various induced voltage

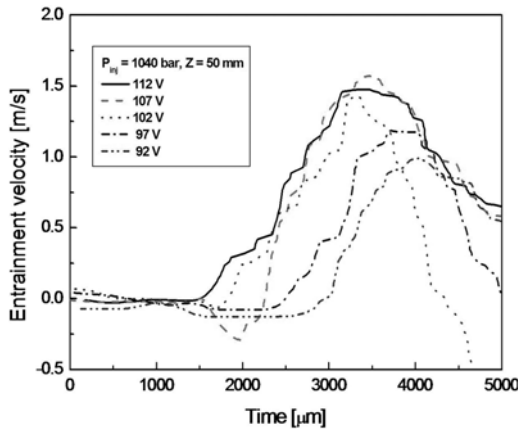
함에 따라 분사 초기 니들의 거동 속도가 증가하게 되고, 분사속도의 커지게 되어 포텐셜 코어가 증가하여 결과적으로 분무각이 더 커지는 것으로 판단하였다. 하지만 분무발달과정이 진행됨에 따라 분무각은 인가전압에 관계없이 일정한 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

### 3.3 인가전압이 주변기체유입속도에 미치는 영향

Fig. 9는 분사압 1040 bar 조건에서 Z방향으로 각각 30, 50 mm 지점에서 측정된 인가전압에 따른 주변 기체 유입속도를 보여준다. 인가전압이 증가함에 따라 전체적인 주변 기체 유입 속도가 빨라지는 것을 알 수 있다. 연료가 분사되고 노즐 근처 영역에서 분무와 주변공기의 전단층(shear layer)에서 불안정(instability)성이 생성된다. 이 분무가 하단으로 발달해 가면서 와류(vortex)를 형성하게 되는데, 이 와류 근처의 유동장으로 주변 공기가 분무 축 방향으로 이동하는 흐름에 의해 분무 주변 영역으로 유입된다. 분사율, 거시적 분무특성 결과를 통해 인가전압이 증가함에 따라 분사 초기 니들의 거동이 빨라지게 되고, 이로 인해 분사 속도가 증가하는 것을 확인하였다. 분사속도의 증가로 와류의 생성이 촉진되어 연료와 주변 공기와의 혼합, 즉 공기 유입 정도가 증가되는 것으로 판단된다. 인가전압이 주변 공기 유입 속도에 미치는 영향을 전체적으로 살펴보기 위하여 Fig. 10과 같이 도식화하였다. 인가전압이 높은 경우, 주변 공기의 유입이 시작되는 시점이 빠



(a)



(b)

Fig. 9 Ambient air entrainment velocity with  $P = 1040$  bar ((a) at  $Z = 30$  mm (b)  $Z = 50$  mm)

르며, 주변 공기 유입 속도가 최고점에 이르는 시간도 빨라지는 것을 확인할 수 있다. 또한 최고 주변 공기 유입 속도 역시 인가전압이 높은 경우가 빠른 것을 알 수 있다.

### 3.4 인가전압이 연료 액적 크기에 미치는 영향

Fig. 11은 분무중심축을 따라 노즐로부터의 거리를 변화시켰을 때 발생하는 입자 크기의 변화를 보여준다. 인가전압이 97, 102 V인 경우 모두에서 분사압이 520 bar에서 1040 bar로 증가함에 따라 입자 크기가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 분사압력을 증가시키면 노즐로부터 분사되는 연료 액적의 속도가 빨라지게 되고 또한 주변 공기와의 운동량 교환이 활발해져 연료의 미립화가 잘 이루어지게 된다. 이로 인해 분사압력을 증가시킬수록 분사되는 연료 액적의 크기가 작아지게 된다.<sup>8,9)</sup> 또한 분사압과 인가전압에 관계없이 노즐로부터의 거리가 증가함에 따라 입자의 크기가 작아지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 12는 반경 방향 거리 증가에 따라 분무 액적의 크기가 감소하는 것을 보여준다. 또한 반경 방향의 거리에 따라 인가전압이 높아짐에 따라 분무 액적의 크기가 작은 경향은 유지됨을 알 수 있다. 반경 방향 거리가 증가함에 따라 분무 액적의 크기가 감소하는 것은 분무 가장자리 쪽의 분무 입자들의 진행속도가 작으며, 결과적으로 주변 공기와 분무 가장자리 사이의 전단에 의한 영향을 더 받기 때문

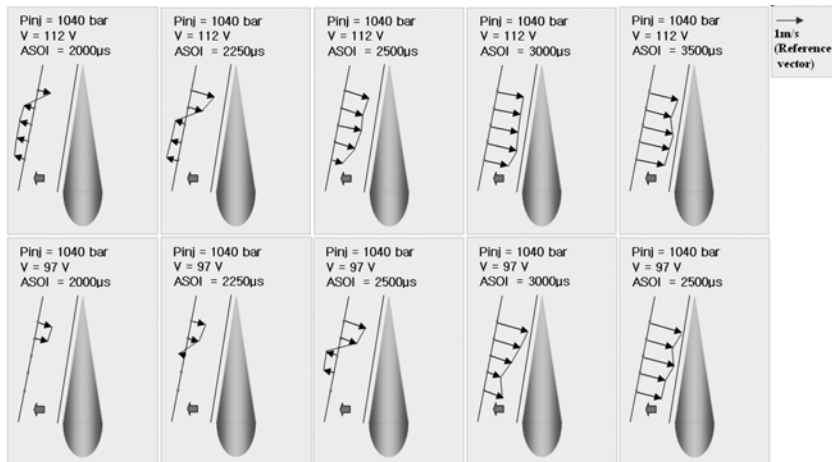
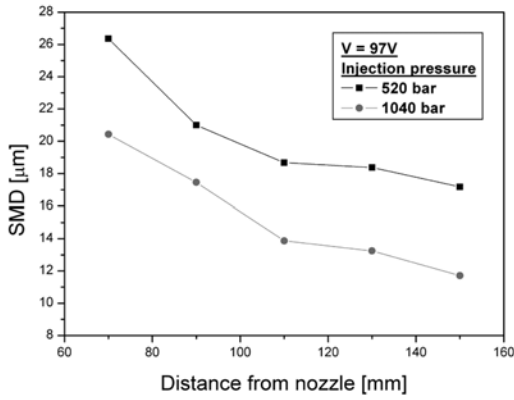
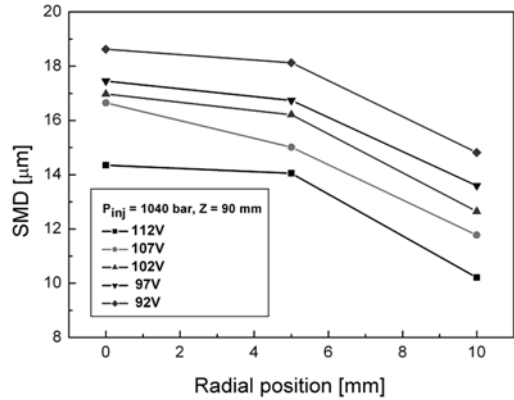


Fig. 10 Comparison of entrainment velocity of ambient gas with induced voltage;  $V = 97$  and  $112$  V,  $P_{inj} = 1040$  bar)

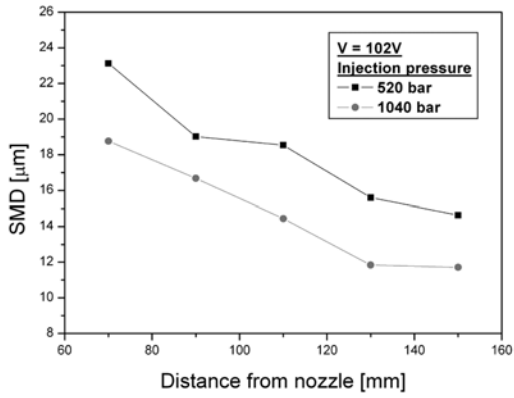
인가전압이 디젤 피에조 인젝터의 분무 특성에 미치는 영향



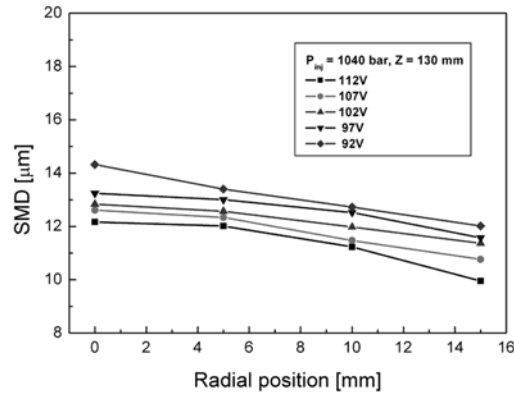
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 11 Fuel droplet size distribution on axial position (radial position  $r = 0$  mm); (a)  $V = 97$  V (b)  $V = 102$  V

Fig. 12 Effect of induced voltage on fuel droplet size with radial position; (a)  $Z = 90$ , (b)  $Z = 130$  mm

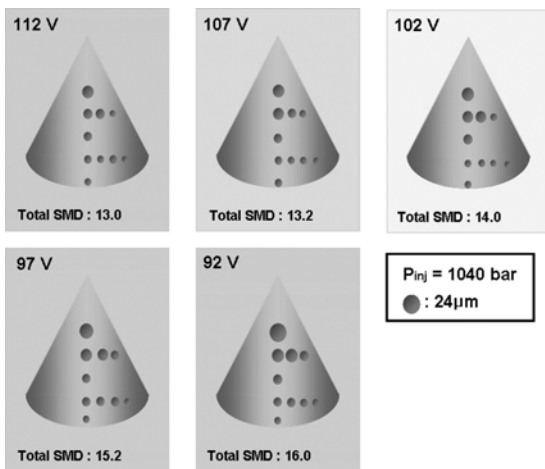


Fig. 13 Comparison of particle size with induced voltage ( $P_{inj} = 1040$  bar)

이다.<sup>10,11)</sup> 인가전압이 분무 액적 크기에 미치는 영향을 Fig. 13에 도식화하였다. 인가전압이 증가함에 따라, 분무 축 방향으로 진행됨에 따라, 그리고 반경 방향으로 진행됨에 따라 분무 액적의 크기가 감소하는 경향이 있음을 확인 할 수 있다.

4. 결론

커먼레일 분사시스템에 장착된 피에조 인젝터를 대상으로 인가전압에 따른 디젤 분무의 분사율 특성과 거시적 분무 특성, 주변기체의 유입 특성 그리고 분무의 입자크기를 살펴보았다. 본 연구를 통해 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 분사압에 무관하게 인가전압의 증가 시 분사 초기 분사율 곡선의 기울기가 증가한다. 이를 통해

인가전압의 증가가 니들의 거동속도에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 또한 피에조 인젝터는 인가전압의 변화를 통해 분사율 형상을 변화시킬 수 있음을 확인하였다.

- 2) 인가전압이 증가함에 따라 분무 도달 거리가 동일시간에서 더 멀어지며 분사초기 구간에서 분무 도달 거리의 증가 기울기가 커진다. 니들이 완전히 열린 상태에서는 분사 속도는 분사압과 노즐 형태에 의한 영향만을 받기 때문에 분무 도달 거리의 증가 기울기가 일정하다. 또한 인가전압의 증가로 분사초기 분무각이 넓어진다.
- 3) 인가전압이 증가함에 따라 주변기체의 유입속도가 빨라지며, 분무입자의 크기가 작아진다.

## 후 기

본 연구는 두산 인프라 코어의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## References

- 1) J. Kang, Spray Characteristics of High Pressure Diesel Injection with regard to Fuel Injection Equipments, Ph. D. Dissertation, KAIST, 2003.
- 2) S. Kim, N. Chung and M. Sunwoo, "Injection Rate Estimation of a Piezo-Actuated Injector," SAE 2005-01-0911, 2005.
- 3) C. Fettes and A. Leipertz, "Potential of a Piezo-Driven Passenger Car Common Rail System to Meet Future Emission Legislations - An Evaluation by Means of In-Cylinder Analysis of Injection and Combustion," SAE 2001-01-3499, 2001.
- 4) J. Lee and K. Min, "Analysis of Hydraulic Characteristics of High Pressure Injector with Piezo Actuator," Transactions of KSAE, Vol.14, No.4, pp.164-173, 2006.
- 5) J. Lee and C. Bae, "Spray Characteristics of Piezo Actuated Injector with regard to Induced Voltage," Fall Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.298-303, 2006.
- 6) J. Lee, K. Min, K. Kang and C. Bae, "Hydraulic Simulation and Experimental Analysis of Needle Response and Controlled Injection Rate Shape Characteristics in a Piezo-driven Diesel Injector," SAE 2006-01-1119, 2006.
- 7) M. C. Lai, T. Wang, H. Xie, J. S. Han, N. Henein, E. Schwartz and W. Bryzik, "Microscopic Characterization of Diesel Spray at VCO Nozzle Exit," SAE 982542, 1998.
- 8) L. Araneo and A. Coghe, "Effect of Injection Conditions on Penetration and Droplet Size of HCCI Diesel Spray," THISEL 2002, Conference on Thermo-and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engine, pp.173-180, 2002.
- 9) J. Y. Koo and J. K. Martin, "Droplet Sizes and Velocities in a Transient Diesel Fuel Spray," SAE 900397, 1990.
- 10) J. Lacoste, C. Crua, M. Heikal and D. Kennaird, "PDA Characterisation of Dense Diesel Spray Using a Common-Rail Injection System," SAE 2003-01-3085, 2003.
- 11) R. Morgan, J. Wray, D. Kennaird, C. Crura and M. R. Heikal, "The Influence of Injector Parameters on the Formation and Break-Up of a Diesel Spray," SAE 2001-01-0529, 2001.