

고압 분사 디젤 인젝터의 노즐 형상이 분사 특성 및 분무 거동에 미치는 영향

Effect of nozzle geometry on the injection characteristics and spray behavior

이창식*, 박성욱**, 전문수***

C. S. Lee, S. W. Park, M. S. Chon

ABSTRACT

This paper describes the characteristics of injection rate and macroscopic behavior of fuel spray injected from common-rail type diesel injectors with different nozzle geometries. The injection rates according to the nozzle geometries were measured at different energizing duration of the injector solenoid and injection pressure by using the Bosch's injection rate meter based on the pressure variation in the tube. The spray behaviors injected from the different nozzles were visualized using the spray visualization system composed of an Ar-ion laser, an ICCD camera, and a synchronization system at various injection and ambient pressures.

It is revealed that VCO nozzle has higher spray tip velocity at the early stage of injection duration and wider spray cone angle than the mini-sac nozzles. Also the spray cone angle is increased with the increase of nozzle diameter.

주요기술용어(Key Words): Spray behavior(분무 거동), Injection rate (분사율), Spray tip penetration (분무 도달 거리), Common-rail injector (커먼레일 인젝터)

기호설명

P_{amb} : ambient pressure
 P_{inj} : injection pressure
 t_{asoi} : time after start of injection
 t_{eng} : energizing duration of injector solenoid
 t_{inj} : injection duration

1. 서론

대기 오염 물질 저감과 연비 개선 등의 요구가 증가됨에 따라 저공해, 고효율 및 고출력 디젤 엔진용 연료 분사 시스템으로 코먼레일 연료 분사 시스템이 개발되었다. 이 시스템은 엔진의 속도나 부하의 변화에 따른 연료 분사량의 정밀 제어가 가능하여 엔진 연소 과정 최적화 및 유해 배기 가스 저감에 적합한 연료 분사 방법으로 사용되고 있다.

또한 코먼레일 연료 분사 시스템은 기존의 시스템에 비해 상대적으로 고압으로 연료를 분사하기 때문에 디젤 엔진의 성능 및 배출물 특

* 한양대학교 기계공학부

** 한양대학교 대학원

*** 충주대학교 에너지시스템공학과

성에 직접적인 영향 인자인 연료 분무의 미립화 특성이 연소 시스템 최적화에 더욱 중요한 변수로 작용하게 되어 이에 대한 많은 선행 연구들이 보고되고 있다.

Lee와 Park⁽¹⁾은 코먼레일식 단공 인젝터를 이용하여 분사 압력이 연료 미립화 특성 및 분무 거동에 미치는 영향을 실험 및 해석적으로 분석하였다. Koo와 Martin⁽²⁾은 고속 분무에 PDPA 시스템을 적용하여 분사 후 시간 경과에 따른 미립화 특성을 규명하였다. 또한 Payri 등⁽³⁾은 분위기 압력의 변화가 분무 선단의 도달 거리, 분무 각, SMD 및 분무 속도에 미치는 영향을 측정하였다. 이외에도 고속 디젤 분무의 거동 및 미립화 특성에 관한 다양한 연구 논문들이 발표되었다⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾.

연료를 고압으로 분사할 경우 노즐 내부의 공동 (Cavitation) 현상으로 인해 유량 계수 (Discharge coefficient)가 감소하고, 분사율이 변하게 된다^{(8),(9)}. 따라서 고압 분사 시스템의 분사율 측정은 인젝터 노즐의 특성을 파악하는데 매우 중요한 인자 중의 하나이다. 연료 분사율의 측정은 관 내에 연료를 분사할 경우 관 내에서 발생하는 압력 변동을 이용하여 측정하는 방법이 Bosch⁽¹⁰⁾에 의해 제안되어, 다양한 연구에 적용되었다⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾.

따라서 본 연구에서는 노즐 형상에 따른 연료의 분사율 특성을 다양한 분사 압력과 분사 기간에서 실험하였다. 또한 노즐 형상의 변화에 따른 분무 거동의 변화를 분석하여, 분사율 특성과의 상관 관계를 규명하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 실험에서는 분사 특성을 측정하기 위한 분사율 측정 장치와, 분무를 가시화하기 위한 분무 가시화 장치를 사용하였다. 노즐의 형상에 따른 분무 특성을 분석하기 위해 Table 1과 같이 서로 다른 노즐 형식, 노즐 홀 지름, 분무 각을 갖는 세 종류의 인젝터를 사용하였다. 인젝터 A와 B의 경우 노즐 홀 지름이 서로 다른 인젝터이고, 인젝터 B와 C의 경우 노즐 홀 지름은 같으나 인젝터 형식이 각각 미니샷 (mini-sac)형과 VCO(Valve Covered Orifice)로 서로 다른 인젝터들이다.

Table 1. Specifications of injectors

Ref.	Nozzle type	Hole diameter	Number of holes	Nozzle cone angle
A	mini-sac	0.138mm	6	153°
B	mini-sac	0.143mm	6	149°
C	VCO	0.143mm	6	153°

2.1 분사율 측정 장치

Fig. 1은 노즐의 형상이 연료 분사 특성에 미치는 영향을 분석하기 위한 분사율 측정 장치이다. 고압의 연료로 충전된 관내로 고압의 연료를 분사하게 되면, 압력 파형이 발생하여 관내로 전달된다. 관내의 압력 변동은 피에조 압력센서를 이용하여 취득하며, 압력 파형과 분사된 연료량을 이용하여 분사율 특성을 분석하였다. 본 실험에서는 관내의 배압을 3MPa로 일정하게 유지하였으며, 300회 분사된 파형을 평균하여 고압 연료의 분사 파형을 구하였다.

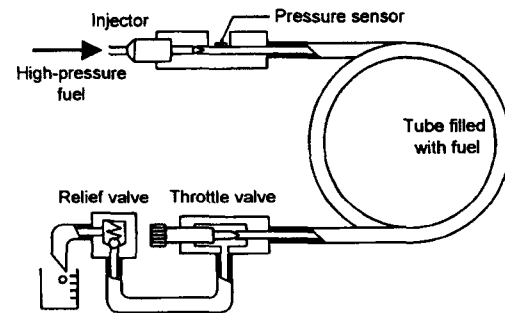


Fig. 1. Injection rate meter⁽¹⁰⁾

2.2 고압 분사 및 분무 가시화 장치

노즐 형상에 따른 연료 분무의 발달 과정을 비교하기 위하여 Fig. 2와 같이 고압 펌프와 분무 가시화 시스템을 구성하였다. 고압 펌프는 공압을 이용하여 연료를 최대 200MPa 까지 가압하여 코먼레일에 공급하도록 하였으며, 두 개의 펌프를 병렬로 연결하여 안정된 분사 압력과 유량을 유지하도록 제작하였다.

분사 후 시간의 경과에 따른 분무의 발달 과정을 가시화 하기 위한 분무 가시화 시스템은 광원, 고압 챔버, ICCD 카메라 및 신호 동기 장치로 구성하였다. 광원으로는 Ar-ion레이저를 사용하였으며, 분위기 압력이 분무 발달 과

정에 미치는 영향을 파악하기 위해 최대 5MPa 까지 가압할 수 있는 고압 챔버를 제작하여 사용하였다. 가시화된 분무 화상은 ICCD 카메라를 이용하여 광량을 증폭하고, CCD의 노출 시간을 조절하여 취득한 후, 이미지 그래버를 통하여 PC에 저장하였다. 이 때, 신호 발생기를 이용하여 인젝터의 분사 신호와 카메라 노출 시간을 동기시켰다.

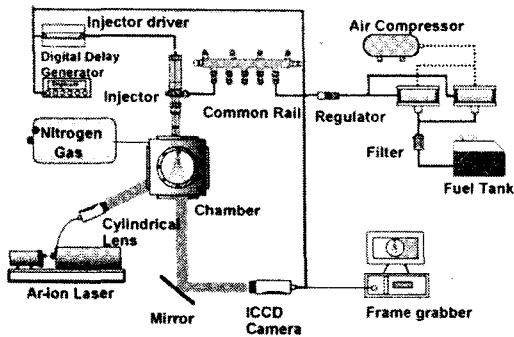


Fig. 2. Spray visualization system

2.3 실험 방법

본 실험에는 인젝터 노즐의 형상, 분사 압력 분위기 압력, 인젝터 솔레노이드의 통전 시간을 변화시켜가며, 분사율을 측정하고 분무 발달 과정을 가시화 하였으며 구체적인 실험 조건은 Table 2와 같다. 분사 시작 후 경과 시간에 따른 분무 선단의 도달 거리를 분석하기 위하여 인젝터 팁에서 분무가 보이기 시작하는 시점을 분무 시작 시간으로 보았으며, 분사 지연 기간은 인젝터 솔레노이드 통전 시작 시점에서 분사율 증가까지 걸리는 시간으로 정의하였다. 분무 이미지의 취득은 분사시작 후부터 2.0ms까지 0.2ms 간격으로 하였으며, 분무각과 분무 이미지에서 나타난 분무 선단의 길이를 이용하여 분무 선단의 도달 거리를 구하였다.

Table 2. Experimental conditions

Injection pressure [MPa]	80, 100, 135
Ambient pressure [MPa]	0.1, 2.0, 4.0
Energizing duration [ms]	0.7, 1.0, 1.3
Light source	Ar-ion laser, 5W
Exposure duration [μ s]	50

고압 챔버는 질소 가스를 사용하여 가압하였으며, 연료는 밀도가 830kg/m^3 이고 동점도가 $2.9\text{mm}^2/\text{s}$ 인 디젤유를 사용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 분사 특성

Fig. 3은 분사 압력 및 인젝터 솔레노이드 통전 기간이 실제 분사 기간에 미치는 영향을 나타낸 그래프이다. 본 연구에서 인젝터의 분사 기간은 인젝터 솔레노이드 통전 후 분사율이 상승하기 시작하여 분사가 끝나기까지의 기간으로 정의하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 세 종류의 인젝터 모두 분사 압력에 거의 관계없이 실제 분사 기간은 인젝터 통전 기간의 1.4배 정도가 되었다. 또한 인젝터 솔레노이드의 통전 기간이 증가할수록 실제 분사 기간은 세 인젝터 모두 통전 기간에 근접하였다. 이러한 경향이 나타난 이유는 통전이 끝난 후 분사 되는 기간은 통전 기간에 관계없이 거의 일정하여, 통전 기간이 증가할수록 그 영향이 줄어들기 때문으로 판단된다.

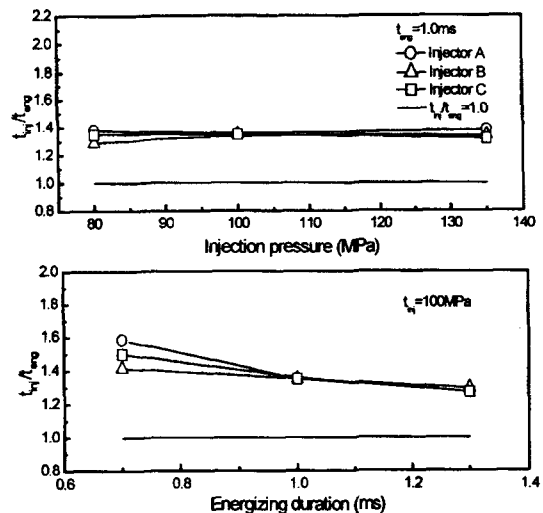


Fig. 3 Injection duration according to injection pressure and energizing duration

Fig. 4는 분사 압력 100MPa, 슬레노이드 통전 기간 1.0ms에서 노즐의 종류에 따른 분사율의 변화를 나타낸 그래프이다. 그림에서 나타난 바와 같이 미니색형인 인젝터 A와 B는 분사 초기에 분사율이 증가한 후 급격히 감소한 반면, VCO형인 인젝터 C의 경우에는 서서히 감소하였다. 이는 인젝터 A나 B는 분사 초기 미니색 내에 있는 연료가 급격히 분사된 후 분사율이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 인젝터 A의 경우 최대 분사율이 인젝터 B보다 큰 노즐 직경으로 인해 최대 분사율은 다소 높은 것으로 나타났다. 또한 통전후 분사율이 상승하기 까지 걸리는 시간인 분사 지연 기간은 0.2-0.3ms였다.

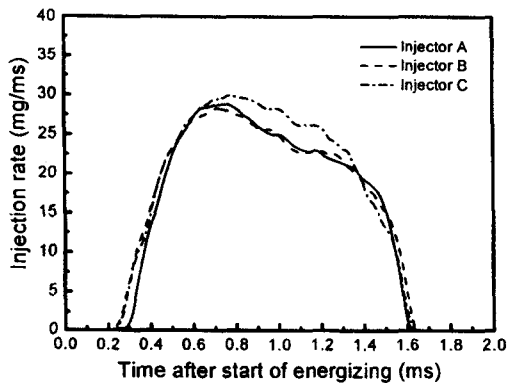


Fig. 4 Effect of nozzle geometry on injection rate ($P_{inj}=100\text{MPa}$, $t_{eng}=1.0\text{ms}$)

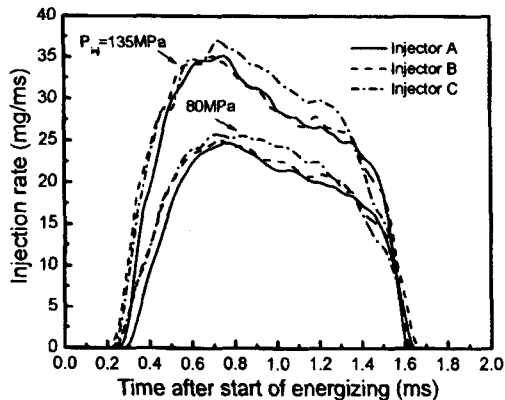


Fig. 5 Effect of injection pressure on injection rate ($t_{eng}=1.0\text{ms}$)

분사 압력이 분사율에 미치는 영향을 분석하기 위해 Fig. 5와 같이 세 종류의 인젝터에 대해 분사 압력이 80MPa과 135MPa인 경우 분사율을 조사하였다. 인젝터 A와 B의 경우 분사 압력이 증가할수록 분사량이 분사 초기에 더욱 집중되는 경향을 보였다. 이는 분사 압력이 증가할수록 미니색 내의 연료와 그 이후 분사되는 연료간의 분사 압력 차이가 커지기 때문인 것으로 보인다. 이러한 현상으로 인해 분사 압력이 증가할수록 미니색형과 VCO형의 분사 경향의 차이도 더욱 커지는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 인젝터 슬레노이드 통전 기간과 분사율과의 관계를 나타낸 그래프이다. 세 종류의 인젝터 모두 분사 기간에 관계없이 통전 후 0.7ms 부근에서 최대 분사율을 보였다. 인젝터 A나 B의 경우에는 최대 분사율 이후 분사율이 급격히 감소하다가 1.4ms 이후에는 거의 일정한 값을 나타낸 반면, 인젝터 C의 경우에는 분사율이 서서히 감소하였다. 이러한 경향은 Fig. 4에서 설명한 바와 같이 인젝터 A 또는 B의 미니색 내에 있던 연료들이 먼저 빠른 속도로 분사되기 때문인 것으로 보인다.

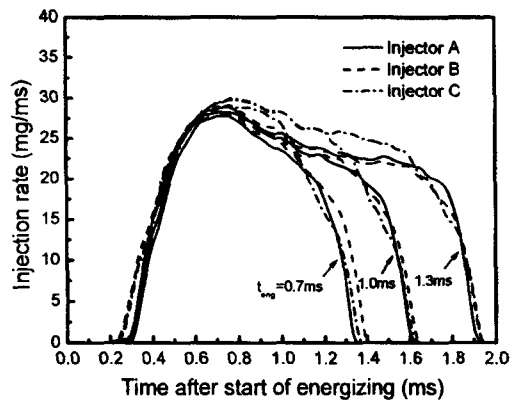


Fig. 6 Effect of injection duration on injection rate ($P_{inj}=100\text{MPa}$)

3.2 거시적 분무 발달 과정

인젝터의 노즐 형상이 코먼레일식 분사 시스템에서 분무 발달 과정에 미치는 영향을 분석하기 위하여 가시화 시스템을 이용하여 연료 분무를 가시화 하고 분무 선단의 도달 거리,

분무 각을 분석하였다. 가시화 실험에서 인젝터 솔레노이드의 통전 기간은 1.0ms로 하였으며, 분사 압력은 80, 100, 135MPa, 분위기 압력은 2MPa과 4MPa에서 실험을 수행하였다.

Fig. 7은 분사 압력 80MPa, 분위기 압력 2MPa에서 분사 시작 후 시간 경과에 따른 분무의 발달 과정을 가시화한 것이다. 이 사진에서 분사 후 경과 시간(t_{asoi})은 인젝터 팁에서 분무가 보이기 시작한 후 경과 시간으로 하였다. 그림에서 세 종류의 인젝터 모두 비슷한 분무 발달 과정을 보였으며, 분사 시작 후 1.2ms동안 분무의 발달이 거의 완료되는 것으로 나타났다.

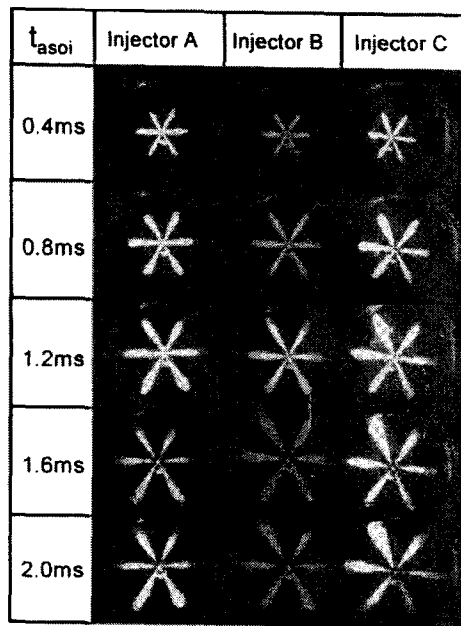


Fig. 7 Effect of nozzle geometry on spray development ($P_{inj}=80MPa$, $P_{amb}=2.0MPa$)

분무의 발달 과정을 정량적으로 분석하기 위하여 분사 후 분무 선단의 도달 거리를 분석하여 Fig. 8에 나타내었다. 세 종류의 인젝터 모두 분사 초기에 급격하게 증가하다가 0.6ms 이후 완만하게 증가하였다. 이는 니들이 열리기 전까지 축적된 고압의 연료가 순간적으로 분사된 이후, 분사 속도가 낮아지기 때문으로 판단된다. 또한 주변 공기의 항력에 의해 분무 선단에는 미립화가 촉진되고, 속도가 감소하는

것도 이러한 경향에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그림에서 노즐의 종류에 따른 분무 선단의 도달 거리 변화는 미미한 것으로 나타났다. 이는 Figs. 4-6의 분사율 실험 결과에서 나타난 바와 같이, 세 종류의 인젝터 모두 최고 분사율은 비슷하여, 이로 인해 분무 선단의 속도가 비슷한 것으로 보인다.

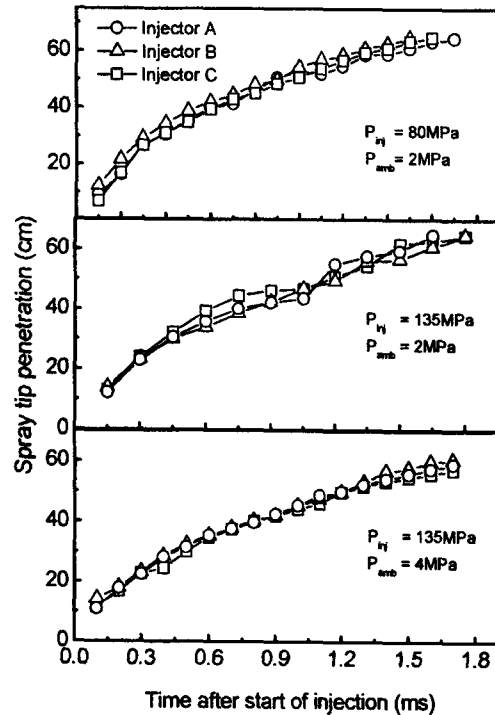


Fig. 8 Spray tip penetration according to nozzle geometry ($t_{eng}=1.0ms$)

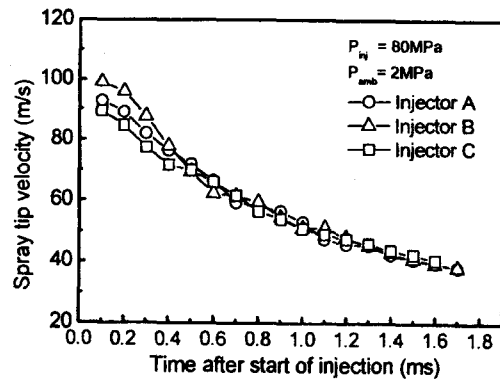


Fig. 9 Spray tip penetration according to nozzle geometry ($t_{eng}=1.0ms$)

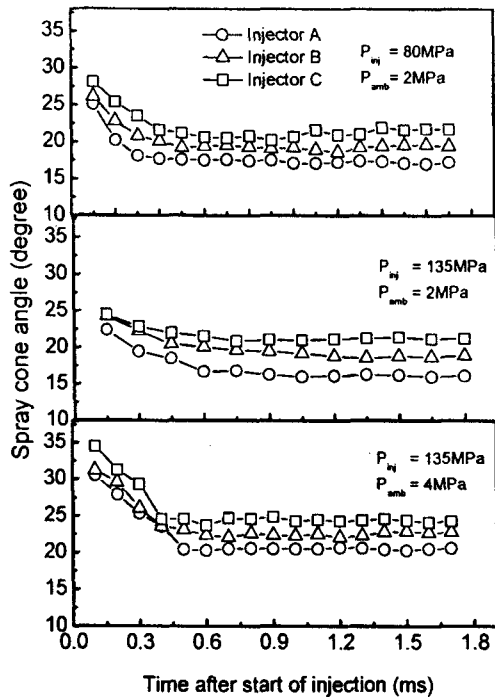


Fig. 10 Spray cone angle according to nozzle geometry ($t_{eng}=1.0ms$)

Fig. 9는 분무 선단의 도달 거리 변화로부터 분무 선단의 속도를 구하여 나타낸 것이다. 인젝터 노즐 형상의 영향을 분석한 결과, 초기에는 미니샷 노즐인 인젝터 A와 B가 VCO 노즐인 인젝터 C보다 분무 선단의 속도가 더 컸다. 인젝터 A와 B의 경우 미니샷에 충전된 고압의 연료가 초기에 분사되기 때문에 VCO형 노즐인 인젝터 C보다 초기 속도가 더 빠른 것으로 판단된다. 또한 인젝터 A의 경우, 인젝터 B보다 초기에는 속도가 더 컸으나 0.4ms 이후에는 인젝터 B와 속도가 비슷하였다. 이러한 경향이 나타난 이유는 초기에는 인젝터 A의 노즐 직경이 더 작으므로 분사 속도가 인젝터 B보다 크나, 분사되는 유량이 작아 주변 기체로부터의 항력을 더 많이 받기 때문인 것으로 보인다.

Fig. 10은 분무 이미지로부터 연료 분무의 각도를 측정해 준 결과이다. 본 연구에서 분무각은 노즐 중심에서 분무의 최외곽이 이루는 각도로 하였으며, 분사 초기에는 분무각이 크고

점점 줄어들어 0.4ms 이후에는 거의 일정한 것으로 나타났다. VCO 노즐인 인젝터 C의 경우, 미니샷 노즐인 인젝터 A 또는 B보다 분무각이 큰 것으로 나타났다. 또한 인젝터 B의 경우 인젝터 A보다 분무각이 큰 것으로 나타났는데, 인젝터 B의 노즐 직경이 더 크기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 서로 다른 노즐 형상을 갖는 코먼레일 인젝터들의 분사 특성 및 분무 발달 과정을 분사율 측정 장치 및 분무 가시화 시스템을 이용하여 분석하였으며, 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) 인젝터의 실제 분사 기간의 슬래노이드 통전 기간의 1.4배 정도 되었으며, 통전 기간이 증가할수록 실제 분사 기간은 슬래노이드 통전 기간에 근접하였다.

(2) 최대 분사율은 세 인젝터 모두 분사 압력이나 통전기간에 관계없이, 통전 시작 후 0.7ms 부근에서 나타났다. 또한 VCO 노즐 인젝터의 경우 최대 분사율 도달 후 미니샷 노즐 인젝터에 비해 분사율이 서서히 감소하였다.

(3) 노즐의 형상이 분무 이미지나 분무 선단의 도달 거리에 미치는 영향은 비교적 미미한 것으로 나타났다.

(4) 분사 초기에 미니샷 노즐 인젝터가 VCO 노즐 인젝터에 비해 분무 선단의 속도가 더 큰 것으로 나타났다. 또한 노즐 직경이 작을수록 분사 초기에 분무 속도가 더 컸으나, 0.4ms 이후에는 세 인젝터 모두 비슷하였다.

(5) 분무각은 VCO 노즐 인젝터가 미니샷보다 더 크고, 노즐 직경이 클수록 분무각이 큰 것으로 나타났다.

후기

이 논문은 2003년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며, 연구를 지원해주신 관계 기관에 감사드립니다 (KRF-2003-042-D20025).

참고문헌

- (1) C. S. Lee and S. W. Park, "An experimental and numerical study on fuel atomization characteristics of high-pressure diesel injection sprays", *Fuel*, Vol 81, No. 18, pp. 2417-2424, 2003
- (2) J. Y. Koo and J. K. Martin, "Droplet sizes and velocities in a transient diesel fuel spray", SAE Paper, 900397, 1990.
- (3) F. Payri, J. M. Desantes, and J. Arregle, "Characterization of D.I. diesel sprays in high density conditions", SAE Paper, 9600774, 1996
- (4) S. W. Park, H. J. Kim, and C. S. Lee, "Investigation of atomization characteristics and prediction accuracy of hybrid models for high-speed diesel fuel sprays", SAE Paper, 2003-01-1045, 2003
- (5) S. W. Park, S. H. Bang, K. H. Lee, C. S. Lee, and J. H. Lee, "Atomization characteristics of common-rail diesel injector with multi-hole", SAE Paper, 2003-01-1844, 2003
- (6) S. W. Park, C. S. Lee, "Macroscopic structure and atomization characteristics of high-speed diesel spray", *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 4, No. 4, pp. 157-164, 2003
- (7) S. Gupta, R. Poola, and R. Sekar, "Effect of injection parameters on diesel spray characteristics", SAE Paper 2000-01-1600, 2000
- (8) W. H. Nurick, "Orifice cavitation and its effect on spray mixing" *Journal of Fluids Engineering*, pp.681-687, 1976
- (9) F. Payri, V. Bermudez, R. Payri, F. J. Salvador, "The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles" *Fuel*, Vol. 83, pp. 419-431, 2004.
- (10) W. Bosch, "The fuel rate indicator: A new measuring instrument for display of the characteristics of individual injection", SAE Paper, 660749, 1966.
- (11) D. A. Nehmer and R. D. Reitz, "Measurement of the effect of injection rate and split injections on diesel engine soot and NOx emissions" SAE Paper, 940668, 1994
- (12) M. Ikegami, K. Nakatani, S. Tanaka, and K. Yamane, "Fuel injection rate shaping and its effect on exhaust emissions in a direct-injection diesel engine using a spool acceleration type injection system", SAE Paper, 970347, 1997
- (13) M. Xu, K. Nishida, and H. Hiroyasu, "A practical calculation method for injection pressure and spray penetration in diesel engines", SAE Paper, 920624, 1992