

고온·고압용기 내에서 핀틀노즐의 분무특성에 관한 실험적 연구

송규근[†]·정재연^{**}·정병국^{*}·안병규^{***}·오은탁^{***}

(원고접수일 : 2002년 4월 17일, 심사완료일 : 2002년 11월 6일)

An Experimental Study on the Spray Characteristic of Pintle Type Nozzle in a High Temperature and High Pressure Chamber

Kyu-Keun Song[†] · Jae-Youn Jung^{**} · Byoung-Kuk Jung^{*} · Byoung-Kyu Ahn^{***} · Eun-Tak Oh^{***}

Key words : Injection Pressure(분사압력), Ambient Pressure(분위기 압력), Fuel Spray (연료 분무), Spray Angle(분무각), Spray Tip Penetration(분무선단거리)

Abstract

The characteristics of fuel spray have an important effect on engine performance such as power, specific fuel consumption and emission because fuel spray controls the mixing and combustion process in an engine. Therefore, if the characteristics of fuel spray can be measured, they can be effectively used for improving engine performance. The major factors controlling fuel spray are injection pressure, ambient pressure and engine speed. In this study, the experiment is performed in a high temperature and high pressure chamber. In experiments, spray tip penetration, spray angle and spray tip velocity are measured at various injection pressure (10 and 14 MPa), ambient pressure(3, 4 and 5 MPa), fuel pump speed(500, 700 and 900 rpm). Experimental results are useful for deriving an experimental spray equation and design an optimal engine. The results showed that injection pressure, ambient pressure and fuel pump speed are important factors influencing on the characteristics of spray. 1) Injection pressure influences on the characteristics of spray. That is, as injection pressure is increased, spray angle is decreased but spray penetration and spray tip velocity is increased. 2) Spray angle and spray penetration are increased as fuel pump speed is increased

1. 서 론
가질 뿐 아니라 내구성, 신뢰성이 우수하고, 연료 사용의 광범위성등 많은 장점이 있지만, NOx와 입자상 물질(Particulate matter)등의 배출에 의
디젤기관은 다른 열기관에 비해 높은 열효율을

† 책임저자(전북대학교 공업기술연구소) E-mail : songkk@moak.chonbuk.ac.kr, T : 063)270 - 2376

* 전북대학교 공업 기술연구소

** 전북대학교 자동차 신기술 연구센터

*** 전북대학교 대학원

한 대기오염이 심각한 문제이다. 이를 해결하기 위해 연료 조성의 변화, 착화 용이성을 위한 분무 미립화의 특성 개선, 흡입 유동계 시스템을 개선하는 등의 연구가 진행되고 있다. 또한 디젤분무의 미립화현상에 관한 연구는 분무 특성이 직접 연소특성을 지배하기 때문에 종래부터 분무의 분열과정, 분무의 입경분포, 연소실 내에서의 분산 상태, 혼합기의 형성과정, 분무거동, 연료의 증기농도 측정 등 수많은 연구가 진행되고 있다.

이중에서도 배출가스 저감을 위해 분무의 미립화는 복잡한 연소특성을 갖는 디젤기관의 연소개선에 크게 영향을 미치는 인자이기 때문에 근래까지도 많은 연구가 진행되어지고 있다.^{1)~6)}

Koo⁶⁾는 직접직분식 고압인젝터의 간헐분사를 대상으로 분무를 가시화하였고, Reitz⁷⁾ 등은 인젝터와 주위환경에 따른 분무각과 분무선단거리 등의 분무특성을 연구하였다. 또한, Hiroyasu^{8),9)}는 분무형성과정이 연소 및 배기특성에 미치는 영향을 밝히기 위해 고온·고압용기에서 분무특성을 연구하였다.

본 연구에서는 실제 기관에서의 분무 특성에 관한 실험식을 도출하고, 기관최적 설계를 위해 단공 핀틀노즐의 분무특성을 밝히고자 한다. 이를 위해 가능한 실제 기관의 조건을 재현하기 위한 고온·고압용기를 제작하여 실험하였다. 또한 실험에 있어서는 연소실의 압력, 분사압력, 회전수를 변화시켜가면서 분무각과 분무도달거리, 분무선단속도를 고속카메라 가시화법을 통해 측정하여 분무특성을 해석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 구성

본 연구에서 사용한 실험장치는 디젤기관의 자유분무를 관찰, 촬영, 해석할 수 있도록 연료 분사장치, 고온·고압용기, 가시화장치 시스템으로 구성하였다. Fig. 1은 본 실험에서 사용된 실험장치의 개략도이다.

실험에 있어서, 노즐은 분공경이 1.02mm, 리프트는 0.45mm인 상용의 단공 핀틀형 노즐을 사용

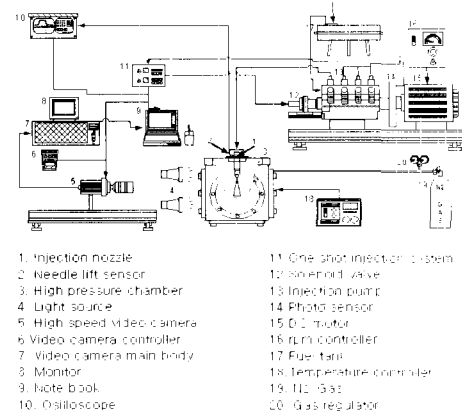


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.

Table 1. Specifications of the fuel injection system.

Items	Specification
Injection Pump	Maker : DIPICO
	Type : PE-4P
	No of plunger : 4
Nozzle(pintle)	No. of Hole : 1
	Hole Dia : 1.022mm
	Needle lift : 0.452mm

하였다. 노즐의 분사압력은 스프링의 장력을 조절하여 10MPa, 14MPa로 변화시켜 실험하였다. 연료 분사펌프는 회전수 컨트롤러가 부착된 직류전동기를 사용하여, 분사펌프의 회전수를 조절하였다. 또한, 1회 분사장치는 Fig. 1에서처럼 분사펌프와 D.C 모터사이의 포토센서시스템을 사용하여 상사점을 검출하였고, 단발분사신호를 획득하였다. 분사펌프의 회전수는 기관회전수의 1/2이다. Table 1에 본 실험에서 사용한 분사펌프와 노즐의 사양을 보인다.

고온고압용기는 내부에 열선을 장착하여 최고 온도 35°C 까지 조절할수 있도록 설계하였으며, 압력을 N₂ 가스를 사용하여 가압, 최고 압력 5MPa까지 조절할 수 있도록 설계하였다. 또한, 3면에 직경 160mm의 석영창을 설치하여 관찰 및 사진촬영을 할 수 있도록 제작하였다.

분무 거동 촬영에 있어서는 고속비디오카메라 (FASTCAM ultima40K)를 사용하였으며, 가시화장치의 광원으로는 할로겐 1kW의 연속광 2개를 사용하였다. 또한, 디젤분무 형상은 9000fps로 촬

영하여 얻어진 영상을 컴퓨터에 전송하여 이미지 데이터를 처리하였다.

2.2 실험방법

본 실험에서는 고온·고압용기를 사용하여 실험하였으며, 가능한 실제 기관 내 조건에서의 현상을 밝히기 위해 분위기 압력($P_a=3, 4, 5\text{MPa}$), 분사압력($P_{inj}=10, 14\text{MPa}$), 분사펌프회전수(500, 700, 900rpm)를 변화시켜가면서 실험을 수행하였다.

분사펌프의 솔레노이드 밸브와 고속비디오 카메라의 구동은 포토센서가 분사펌프에서 검출한 5V 펄스신호를 트리거 신호로 받아 작동한다. Fig. 2에 실험장치의 작동신호 타이밍 선도를 보인다.

단발분사장치의 재현성의 문제를 확인하기 위해 연속분사시의 분무와 비교하였으며, 실험의 오차를 줄이기 위하여 20개의 분무표본을 측정하였다. 또한 분사량의 측정에 있어서는 오차를 최소화하기 위해 1분간 분사량을 5회 측정하여 계산하였다.

고압용기의 분위기 가스로는 분무의 착화를 방지하기 위하여 N_2 가스를 사용하였다. 고압 분위기에서 각각 자유분무 형상을 촬영하여 분무 도달거리, 분무각 등을 해석하였다. 실험에 들어가기 앞서 검정을 위해 스케일을 측정하여 기록하였다.

니들 양정 특성은 Woolf사 니들리프트 센서를 장착하여 검출하였다.

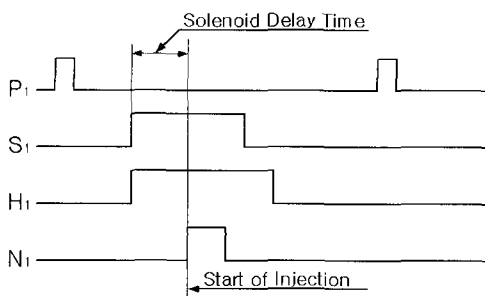


Fig. 2 Pulse timing diagram in spray image capture system(P_1 : Photosensor output signal, S_1 : Solenoid input signal, H_1 : High speed video camera input signal, N_1 : Needle lift signal).

3. 실험결과 및 고찰

3.1 고압용기 내에서의 분무형상

본 연구에서는 고속비디오카메라를 사용하여 분사압력, 분위기압력, 회전수변화에 따른 분무형상을 촬영하여 분무도달거리, 분무각, 분무선단속도 등 분무특성을 해석하였다.

Fig. 3, Fig. 4는 분위기 압력 $P_a = 3\text{MPa}$, 분사펌프회전수 700rpm인 상태에서 각각 분사압력을 10MPa, 14MPa로 변화시켜가면서 상온 상태에서의 분무형상을 9000fps로 촬영한 사진이다. 분무 사이의 시간간격은 0.11ms이며, 총시간 1.89ms동안의 연속사진이다.

사진에서 알 수 있듯이 10MPa과 14MPa 모두 분무 초기에는 분열이 일어나지 않고 축방향으로 빠르게 진행되고, 분무 후반에 주위의 저항으로 분

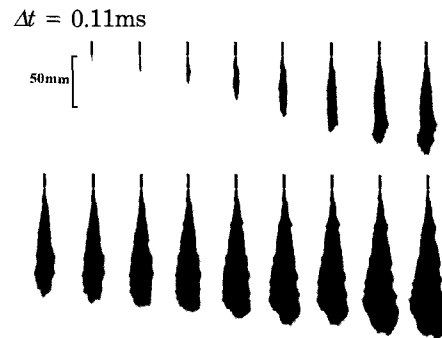


Fig. 3 Photographs of diesel spray in high pressure chamber ($P_{inj}=10\text{MPa}$, $P_a=3\text{MPa}$, 700rpm, 9000fps).

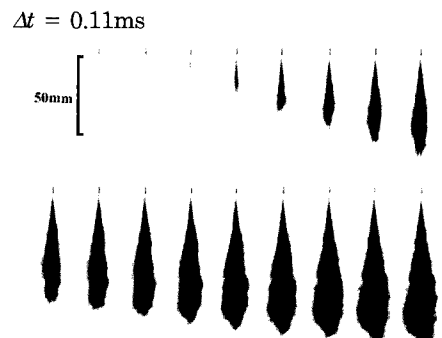


Fig. 4 Photographs of diesel spray in high pressure chamber ($P_{inj}=14\text{MPa}$, $P_a=3\text{MPa}$, 700rpm, 9000fps).

열이 일어나면서 분무 외관부분이 흐트러짐을 알 수 있다.

Fig. 5는 분무과정을 보다 쉽게 비교 분석하기 위하여 실험과정 동안의 연속사진을 컴퓨터를 이용하여 시간에 따라 분무외관만을 표시한 결과이다.

분무초기 분무의 구조는 분사압력 10MPa과 14MPa 모두 노즐의 반경방향보다 축방향으로 진행이 빠르게 성장되어지고 있음을 알 수 있다.

이처럼 밀도가 매우 높은 분무중심부가 분무초기에 노즐에서 전달된 대부분의 운동에너지를 보유하고 있는 에너지원으로 작용하고 있어 가지모양의 형태로 성장해 가고 있다. 그러나 분무후기에는 액주표면과 주위기체의 상호 마찰력, 저항의 영향으로 상대속도 차이가 커지고 분무선단부에서부터 분열이 일어나면서 선단부의 감소된 운동량은 축방향보다 반경방향으로 이탈속도가 전환되어 점차 축방향 진행속도가 감소하면서 반경방향으로 넓게 진행하고 있다. 또한 10MPa 분사압의 경우는 14MPa보다 축방향 속도가 더 느려짐을 관찰할 수 있었다. 즉 분사압력이 커짐에 따라 분무도달거리가 증가하고 있다.

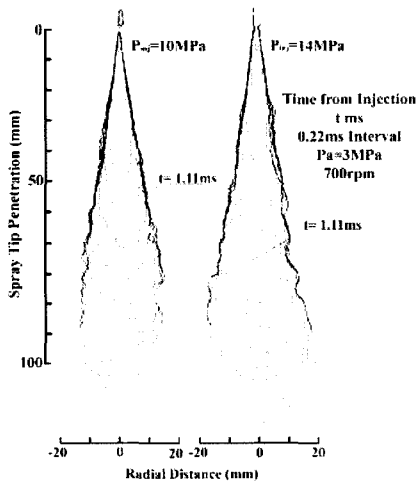


Fig. 5 Contour line of diesel spray with variation of injection pressure.

3.2 분무특성에 미치는 분사압력의 영향

분무특성에 미치는 분사압력의 영향을 밝히기 위해 분위기압력이 3MPa로 일정한 상태에서 분사압력을 각각 10MPa, 14MPa로 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다.

Fig. 6은 노즐분사압력(10MPa, 14MPa)의 변화에 따른 분무각의 변화를 표시한 것이다. (a)는 회전수 500rpm, (b)는 회전수 900rpm에서의 결과이다. (a), (b) 모두 회전수에 관계없이 분사압력이 증가함에 따라 분무각이 줄어들고 있다. 또한, 전반적인 경향은 (a), (b) 모두 분무 초기에는 분사시간이 지남에 따라 분무각이 점점 감소하다가, 분무중반부터는 거의 일정한 상태로 변화하고 있다. 분

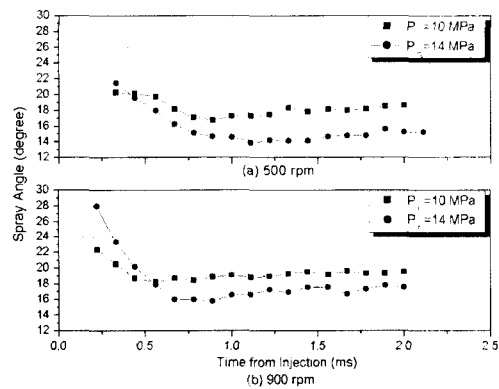


Fig. 6 Effect of nozzle injection pressure on diesel spray angle ($P_a=3\text{MPa}$).

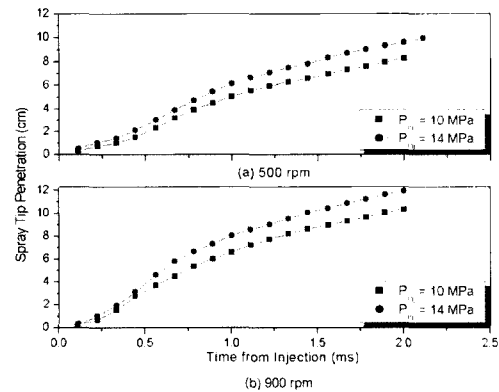


Fig. 7 Effect of nozzle injection pressure on diesel spray tip penetration ($P_a=3\text{MPa}$).

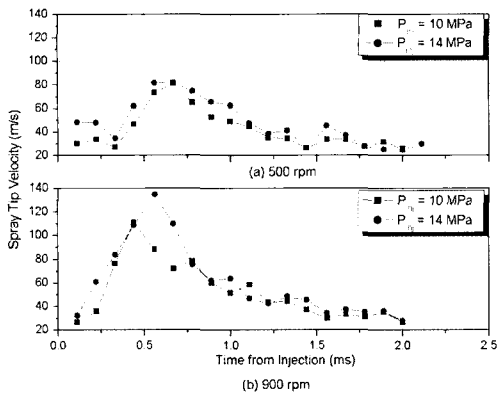


Fig. 8 Effect of nozzle injection pressure on diesel spray tip velocity.

무 초기에는 10MPa의 분사압력에 비해 14MPa일 때가 분무각이 크게 나타나는 경향을 보이다가, 일정 시간 이후부터는 분사압력이 큰 14MPa일 때가 분무각이 작아지고 있다. 일반적으로 분사압력이 상승함에 따라 분무각은 불완전 분무영역에서는 분사압력과 함께 상승하며 불완전 분무영역에서 완전분무영역의 천이영역에서 최대 분무각을 보인 후 완전분무영역에서는 감소한 후 일정 분무각을 가지는 것으로 알려져 있는데⁹⁾, 본 실험 조건은 불완전 분무영역에서 완전분무영역으로 넘어가는 천이영역에 노즐의 분사속도가 포함되어 있는 것으로 여겨지며, 14MPa는 완전분무영역에 포함되는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 분무도달거리에 미치는 분사압력의 영향을 표시한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 회전수에 관계없이 분사압력이 증가함에 따라 분무도달거리는 증가하고 있다. 또한, 분무시간에 따른 분무선단거리의 측정 결과, 크게 2개의 기울기를 갖는 특징을 보인다. 분무초기는 기울기가 급하고, 후기에는 완만함을 보이고 있다. 즉 초기에는 분무진행 속도가 빠르고, 후기에는 느려지고 있다.

분사초기는 분사압력의 증가와 액적 분열이 일어나기 전 상태로서 초기 분무속도가 크기 때문이며, 분사 후 어느 시간이 지난 후에는 주위공기의 저항 및 마찰력으로 인해 액적분열이 일어나면서 그 분무진행속도가 작아지기 때문이다.

Fig. 8은 분무선단속도에 미치는 분사압력의 영향을 검토한 결과이다. (a)는 회전수 500rpm, (b)

는 900rpm일 때의 분무선단속도를 표시하고 있다. 전체적인 경향은 분사 후 어느 시간(약 0.66ms)에서 분무선단속도가 최대를 보이고 있으며, 이를 기준으로 초기에는 증가하다가 후반에 감소하는 경향을 보이고 있다.

이는 주변공기의 저항으로 본격적으로 분열이 시작되어 액주 상태에서 액적들로 변하면서 전반적인 선단속도가 감소한다고 판단된다. 또한 분무 초기에는 운동에너지의 중첩, 즉 초기 분무군에 후속분무군의 영향으로 축방향속도가 증가하는 것으로 판단되며, 약 0.6~0.7ms상태에 이르러서 이런 영향이 적게 나타나게 되는 것으로 판단된다.

3.3 분무특성에 미치는 연료분사펌프 회전

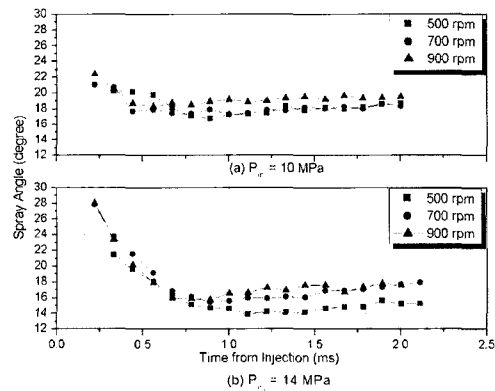


Fig. 9 Effect of injection pump speed on diesel spray angle.

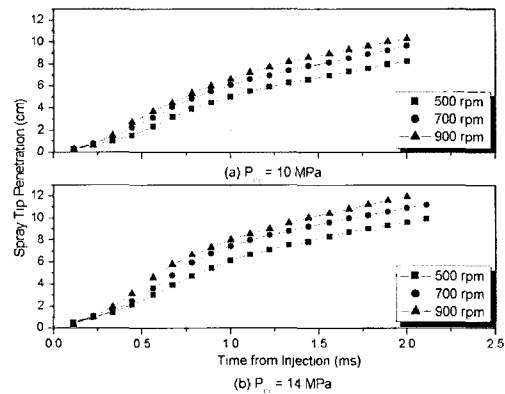


Fig. 10 Effect on injection pump speed on diesel spray tip penetration ($P_a=3$ MPa).

전수의 영향

분무의 특성에 미치는 회전수의 영향을 검토하기 위해 분위기압력을 3MPa로 일정한 조건하에서 분사압력이 10MPa, 14MPa인 노즐을 사용하여 분사펌프회전수를 각각 500, 700, 900rpm으로 변화시켜가면서 분무각, 분무도달거리, 분무선단속도를 측정 해석하였다.

Fig. 9는 분사펌프회전수가 분무각에 미치는 영향을 나타낸 그래프이다. (a)는 분사압력 14MPa, (b)는 분사압력 10MPa일때의 실험결과이다. (a), (b)에서 알 수 있듯이 분무각은 회전수가 증가할수록 약간 크게 나타나는 경향을 보이고 있으며, 또한 분사압력이 낮은 10MPa에서는 분무시간에 따른 분무각이 거의 일정한데 비해 14MPa인 경우는 초기에 분무각이 급격하게 감소한 후, 어느 시간 이후부터는 일정한 경향을 보이고 있다. 이는 분사압력이 커짐에 따라 분사직후 압력차로 인한 팽창효과와 주위의 저항, 마찰력이 커지기 때문이라 생각된다.

Fig. 10은 연료분사펌프의 회전수가 분무도달거리에 미치는 영향을 검토한 그래프이다. 분무도달거리는 노즐의 분사압력에 관계없이 (a), (b) 모두 회전수가 상승할수록 증가하고 있다. 또한 펌프회전수가 500rpm에서 900rpm으로 증가함에 따라 분무도달거리가 증가하는 경향을 보인다. 이는 500rpm의 경우 분사압이 충분히 상승치 못한 반

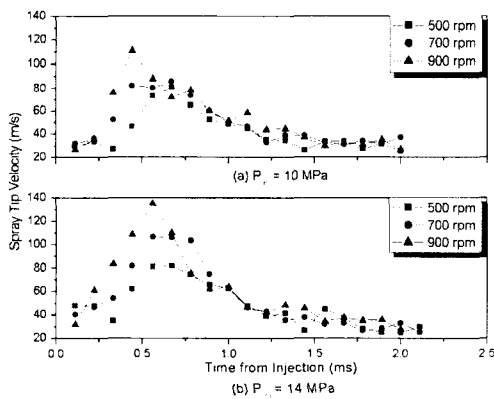


Fig. 11 Effect of injection pump speed on diesel spray tip velocity.

면 900rpm의 경우 회전수 증가로 인한 플린저 상승속도가 증가하고 이는 분사율증가로 이어져 분사압력을 높게 형성, 도달거리에 영향을 준 것으로 판단된다

Fig. 11은 회전수가 분무선단속도에 미치는 영향을 표시한 그래프이다. 분무초기에는 회전수의 영향이 나타나서 회전수가 증가 할수록 분무선단속도는 증가하고, 어느 시간 이후에는 점점 감소하면서 분무 후반기에는 거의 영향이 나타나지 않는 경향을 보인다. 이것은 회전수가 증가 할수록 분사시간이 짧아져 후속 분무의 운동량이 전달되어 분무속도가 증가하기 때문이다.

3.4 분무특성에 미치는 분위기 압력의 영향

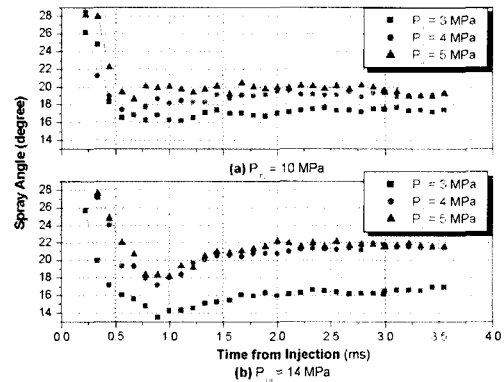


Fig. 12 Effect of ambient pressure on diesel spray angle.

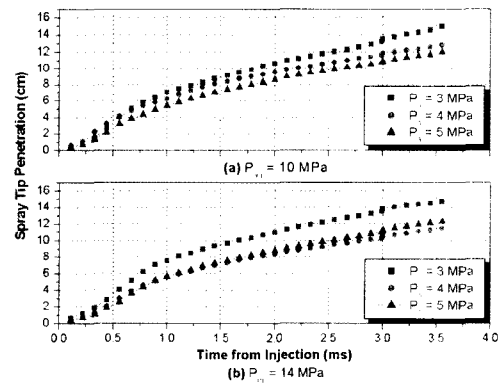


Fig. 13 Effect of ambient pressure on diesel spray tip penetration.

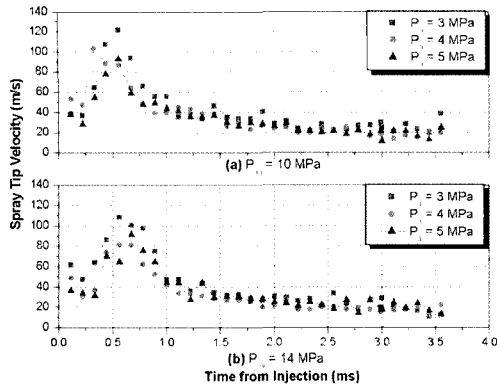


Fig. 14 Effect of ambient pressure on diesel spray tip velocity.

분무특성에 영향을 미치는 인자는 무수히 많다. 이들 중에서도 특히 분위기압력은 분무특성에 크게 영향을 미치는 인자라 판단되어 실험, 검토하였다. 실험에 있어서는 분사압력 10, 14 MPa 상태에서 분위기 압력을 각각 3, 4, 5 MPa로 변화시켜가며 실험하였다.

Fig. 12는 분위기압력이 분무각에 미치는 영향을 표시한 그래프이다. (a)는 분사압력이 10 MPa (b)는 분사압력 14 MPa에서의 결과이다. (a), (b) 모두 분위기압력이 증가함에 따라 분무각은 증가하고 있다. 또한 분무각 변화는 분위기 압력이 변하여도 분무 초기에는 급격히 작아지다가 후기에는 거의 일정한 경향을 보이고 있다.

Fig. 13은 분위기 압력이 분무도달거리에 미치는 영향을 나타낸 그래프이다. 분무시간에 따른 분무도달거리 변화는 (a), (b) 모두에서 거의 비슷한 변화 경향을 보이고 있다. 또한 분위기 압력이 증가할수록 10 MPa, 14 MPa 모두 도달거리가 감소하고 있다. 이는 분위기 밀도의 증가가 축방향 속도를 반경방향 속도로 변환하는데 기여하기 때문이라 생각된다.

Fig. 14는 분위기 압력이 분무선단속도에 미치는 영향을 나타낸 결과이다. 분위기압력이 증가함에 따라 분무최고선단속도는 약간 불규칙하지만 감소하는 경향을 보이며, 분사압을 14 MPa로 증가시켰을 경우 분무선단속도가 빨라졌을 뿐 여전히 분위기압에 따라 분무최고선단속도는 감소하는 경향을 보인다. 또한 분사 후 1.5 ms 이후부터

는 분위기 압력에 따른 큰 영향없이 안정적으로 감소하고 있다. 이는 분위기압력 증가가 분무에 저항으로 작용하기 때문이다.

4. 결 론

본 실험에서는 고온·고압용기에 편틀형 노즐을 사용하여 상온상태에서의 분무특성에 미치는 분사압력, 분위기압력 그리고 분사펌프회전수의 상관관계를 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분사압력은 분무특성에 크게 영향을 미치는 인자이다. 즉 분사압력이 증가하면 분무각은 감소하고, 반면 분무도달거리, 분무선단속도는 증가하였다.
- 2) 연료분사펌프 회전수가 분무특성에 미치는 영향은 회전수가 증가 할수록 분무각, 분무도달거리는 증가하였다.
- 3) 분위기압력은 분무특성에 크게 영향을 미치는 인자로서, 분위기 압력이 증가하면 분무각은 증가하나, 분무도달거리는 감소하였다.
- 4) 분무선단속도는 분열이 일어나기 전에는 회전수의 영향이 뚜렷하게 나타나는 반면 분열이 일어난 후에는 회전수의 영향이 거의 없음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] A. Constantine, "Spray Characterization in Direct-Injection Diesel Engines", International Symposium Advanced Spray Combustion, ISASC, Hiroshima. pp.91-108, 1994
- [2] L. Siebers, "Scaling Liquid-Phase Fuel Penetration in Diesel Sprays Based on Mixing-Limited Vaporization", SAE SP-1415, pp.223-248, 1999
- [3] H. Hiroyasu, "Experimental and Theoretical Studies on the structure of Fuel Sprays in Diesel Engines", Fifth International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS paper B, pp.17-31, 1991
- [4] K. K. Song, H. Hiroyasu and T. Yoshizaki, "Three-Dimensional Spray Distributions in a

- Direct Injection Diesel Engine", SAE Paper 941693
- [5] 송규근, 류호성, "고온분위기에서의 디젤분무의 거동에 관한 연구", 한국박용기관학회논문집 24권 4호, pp454-459, 2000
- [6] J. Y. Koo, J. K. Martin, "Droplet Size and Velocity in a Transient Diesel Fuel Spray", SAE paper 900397
- [7] R. D. Reitz and F. B. Braco, "On the Dependence of Spray Angle and other Spray Parameters on Nozzle Design and Operation Conditions", SAE paper 790494
- [8] H. Hiroyasu and M. Arai "Fuel Spray Penetration and Spray Angle in Diesel Engines", Trans. JSME, Vol. 21, pp.5-11, 1980
- [9] H. Hiroyasu and M. Arai, "Structures of fuel sprays in diesel engines, SAE paper 900475

저 자 소 개



송규근(宋圭根)

1954년 12월 26일생. 1981년 전북대학교 졸업. 1983년 전북대학교 대학원졸업(석사). 1987년 일본 북해도대학교 대학원졸업(박사). 1990. 3~현재 전북대학교 교수.



정재연(鄭材鍊)

1952년 1월생. 1977년 전북대학교 졸업. 1980 전북대학교 대학원 졸업(석사). 1988년 일본 동경공업대학 대학원 졸업(공학박사). 1981년~ 현재 전북대학교 교수.



오은탁(吳殷鐸)

1975년 4월생. 2000년 전북대학교 졸업. 2002년 전북대학교 대학원 졸업(석사).



정병국(鄭秉國)

1971년 7월생. 1996년 전북대학교 졸업. 1999 전북대학교 대학원 졸업(석사). 2002 일본 가고시마 대학교 대학원 졸업(박사)



안병규 (安柄奎)

1975년 8월생. 2001년 전북대학교 졸업. 2003년 전북대학교 대학원 졸업(석사).