

분무특성에 미치는 압력·온도의 영향

오은택*·류호성*·안병규*·송규근**·정재연***

An Effect of Pressure and Temperature on Spray Characteristic

Euntak Oh, Byoungkyu Ahn, Hosung Ryu, Kyukeun Song and Jaeyoun Jung

Key Words: Ambient Pressure(분위기 압력), Free Spray(자유분무), Spray Angle(분무각), Spray Tip Penetration(분무도달거리), Nozzle Injection Pressure(노즐분사압력)

Abstract

This experimental study is to investigate the intermittent spray characteristics of a pintle nozzle. High speed camera used in this experiment with 9000fps.

The factor, which controls the diesel spray, is the Injection pressure, ambient pressure and ambient temperature. In this paper, experiments were conducted free spray for the ambient pressure(3, 4, 5Mpa), nozzle Injection pressure(10, 14, 18MPa) and ambient temperature(293, 473K). With the higher opening pressure, the spray tip velocity and spray penetration increases while the spray angle decreases, On the other hand, With the higher ambient pressure, the spray angle increase while the spray tip penetration and spray tip velocity decrease. also, With the higher ambient temperature, the spray penetration decrease while the spray angle decrease.

기호설명

P_a : Ambient Pressure, N/m^2

P_{inj} : Nozzle Open Pressure, N/m^2

ρ_a : Ambient Density, kg/m^3

1. 서론

디젤엔진은 다른 열기관에 비해 높은 열효율을 가질 뿐 아니라 내구성, 신뢰성도 탁월하여 자동차 시장에서 동급의 불꽃점화엔진보다 시장점유율이 증가하고 있는 추세이다. 디젤 기관은 다른

기관과 달리 열효율이 높고 다종의 연료를 사용할 수 있는 장점이 있지만 NOx와 입자상물질 등의 배출에 의한 대기오염이 심각한 문제가 되고 있다. 이를 해결하기 위해 연료의 조성을 바꾸어 보거나 착화가 용이하게 분무의 미립화 특성을 개선해보거나, 흡입공기 유동계를 개선하는 등의 연구가 진행되고 있다. 이 중에서도 배기가스 저감을 위해 분무의 미립화는 복잡한 연소특성을 갖는 디젤기관의 연소개선에 크게 영향을 미치는 인자이기 때문에 근래까지도 많은 연구가 진행되어 지고 있다.^{1)~6)}

koo⁷⁾는 디젤직분식 고압인젝터의 간헐분사를 대상으로 분무를 가시화 하였고, Braco⁸⁾ 등은 인젝터와 주위환경에 따른 분무각과 분무선단거리 등의 분무특성을 연구하였다. 또한 Hiroyasu⁹⁾는 분무과정이 연소 및 배기특성에 미치는 영향을 밝히기 위해 고온·고압용기에서 분무특성을 연구하였다.

* 전북대학교 정밀기계 대학원

** 전북대학교 자동차신기술연구소

*** 전북대학교 공업기술연구소

본 연구에서는 실제 작동엔진의 조건에서의 단공 핀틀노즐의 분무특성을 밝히기 위해 고온·고압용기를 제작하여 실제 엔진의 조건에서의 분무 해석을 하였다. 또한 분무특성을 밝히기 위한 실험에서는 연소실의 압력, 분사압력, 회전수를 변화시켜가면서 분무각과 분무도달거리, 분무선단 속도등을 측정하여 분무특성을 해석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 구성

본 연구에서 사용한 실험장치는 디젤기관의 자유분무를 관찰, 촬영, 해석할 수 있도록 연료 분사장치, 고온고압용기, 가시화 시스템으로 구성하였다. Fig. 1은 본 실험에서 사용된 실험장치의 개략도 이다.

실험에 사용된 노즐은 분공경이 1.02mm, 리프트는 0.45mm인 단공 핀틀형 노즐이다. 노즐의 분사압력은 스프링의 장력을 조절하여 10MPa, 14MPa로 변화시켜 실험하였다. 연료 분사펌프는 회전수 조절 컨트롤러가 부착된 직류전동기를 사용하여 구동, 분사펌프의 회전수를 조절하였다. 또한 1회 분사장치는 Fig. 1에서처럼 Injection Pump와 D.C Motor 사이의 Sensor System의 포토센서에 의해 상사점을 검출하여 단발분사 신호를 획득하였다. 분사펌프의 회전수는 엔진회전수의 1/2이다.

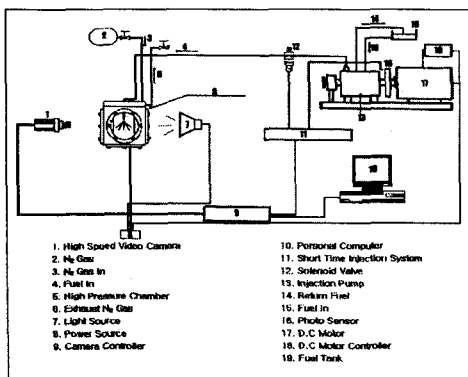


Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Setup.

고온고압용기는 최고온도 673K, 최고 압력 50MPa까지 조절할 수 있도록 설계되었으며, 3면

에 직경 160mm의 석영창을 설치하여 관찰 및 사진촬영을 할 수 있도록 제작하였다.

분무 특성을 밝히기 위한 가시화 장치의 Light Source는 연속광으로 할로겐 1KW 2개를 사용하였으며, High Speed Video Camera (FASTCAM ultima40K)를 사용하여 Diesel Spray의 영상을 9000fps로 획득하였고, 얻어진 영상을 Personal Computer로 전송하여 이미지 데이터를 처리하였다.

2.2 실험방법

본 실험에서는 고압용기를 제작하여 가능한 실제 엔진 조건에서의 현상을 밝히기 위해 분위기 압력(3, 4, 5MPa), 분사압력(10, 14, 18MPa), Injection Pump의 Speed(500, 700, 900rpm)로 변화시켜가면서 실험을 수행하였다.

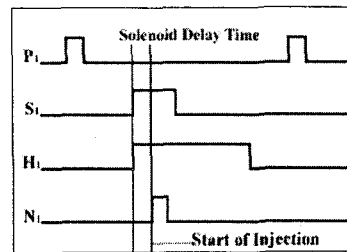


Fig. 2 Pulse Timing diagram in Spray image capture system(P1 : Photosensor output signal, S1 : Solenoid input signal, H1 : High speed video camera input signal, N1 : Needle lift signal)

Injection Pump의 솔레노이드 밸브와 고속비디오 카메라의 구동은 Photosensor가 Injection Pump에서 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. 고압용기의 분위기가스로는 분무의 착화를 방지하기 위하여 N₂ 가스를 사용하였다.

고압 분위기에서 각각 자유분무 형상을 촬영하여 분무 도달거리 분무각 등을 해석하였다. 실험에 들어가기 앞서 캘리브레이션을 위해 스케일을

측정하여 기록하였다.

3. 실험결과

3.1 분무특성에 미치는 분사압력의 영향

분무특성에 미치는 분사압력의 영향을 밝히기 위해 분위기압력이 3MPa인 상태에서 분사압력을 10, 14, 18MPa로 변화시켜가면서 실험을 수행하였다.

Fig. 3, Fig. 4은 실험에서 얻어진 분무의 사진과 분무의곽선을 보이고 있다. Fig. 3은 분위기압력 $P_a=3\text{MPa}$, Injection Pump Speed 700rpm인 상태에서 분사압력 18MPa일 때의 분무형상을 9000fps로 촬영한것이다. 분무사이의 시간 간격은 0.11ms이며 총시간은 1.89ms동안의 연속사진이다. Fig. 4은 실험과정동안의 연속사진을 컴퓨터를 이용 사진을 시간에 따른 분무의곽만을 재구성한 것이다.

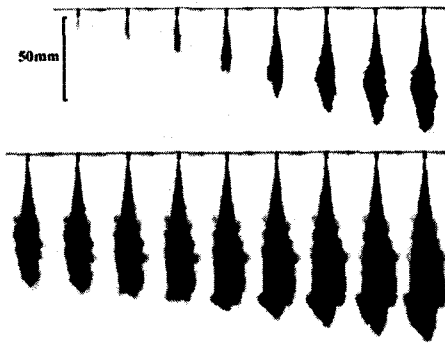


Fig. 3 Photographs of Diesel Spray in High Pressure Chamber($P_{inj}=18\text{MPa}$, $P_a=3\text{MPa}$, 700rpm, 9000fps)

Fig. 5은 노즐분사압력(10, 14, 18MPa)의 변화에 따른 분무각의 변화를 표시한 것이다. (a)는 회전수 500rpm, (b)는 회전수 900rpm에서의 결과이다. (a), (b) 모두, 즉 회전수에 관계없이 분사압력이 증가함에 따라 분무각이 감소하고 있다. 또한 전반적인 경향은 (a), (b) 모두 분사시간이 지남에 따라 분무각이 점점 감소해지면서 일정한 상태로 변화하고 있다. 또한 14MPa의 분사압력 대비 10MPa의 분무각이 크게 나타난다. 일반적으로 분사압력이 상승함에 따라 분무각은 불완전

분무영역에서는 분사압력과 함께 상승하며 불완전 분무영역에서 완전분무영역의 천이영역에서 최대 분무각을 보인 후 완전분무영역에서는 약간 감소한 일정 분무각을 가지는 것으로 알려져 있다¹⁰⁾. 본 실험시 불완전 분무영역에서 완전분무영역으로 넘어가는 천이영역에 분사압력 10MPa의 노즐의 분사속도가 포함되어 있는 것으로 여겨지며 14MPa은 완전분무영역에 포함되는 것으로 판단된다. 따라서 분무각이 작아진다고 생각된다.

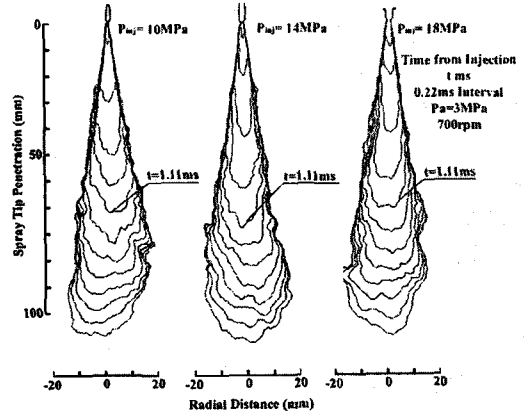


Fig. 4 The outline of Diesel Spray Photographs ($P_a=3\text{MPa}$).

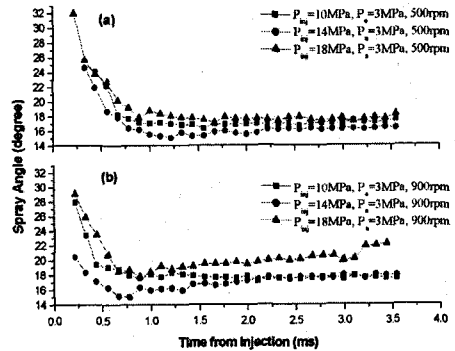


Fig. 5 Effect of Nozzle Injection Pressure on Diesel Spray Angle

Fig. 6는 분무도달거리에 미치는 분사압력의 영향을 표시한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 회전수에 관계없이 분사압력이 증가함에 따라 분무도달거리는 증가하고 있다. 또한 분무도달거리 곡선은 크게 2부분으로 구분해 볼 수 있으며 분무초기가 기울기가 크고, 후기에는 완만함을 보

이고 있다. 즉 초기에는 분무진행 속도가 빠르고, 후기에는 느려지고 있다. 이는 분사압력의 증가로 초기 분무속도가 크기 때문이며, 분사 후 어느 시간이 지난 후에는 주위공기의 저항 및 마찰력으로 인해 액적분열이 일어나면서 그 분무진행 속도가 작아지기 때문이다.

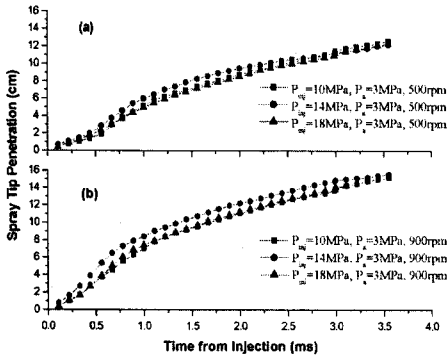


Fig. 6 Effect of Nozzle Injection Pressure on Diesel Spray Tip Penetration

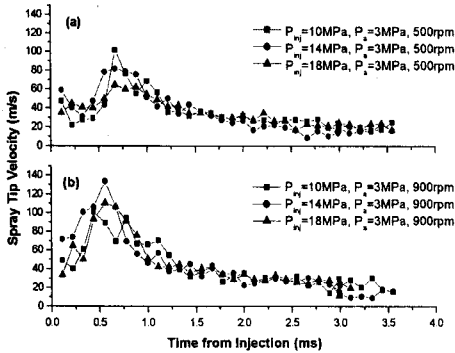


Fig. 7 Effect of Nozzle Injection Pressure on Diesel Spray Tip Velocity

Fig. 7은 분무선단속도에 미치는 분사압력의 영향을 표시한 그래프이다. (a)는 회전수 500rpm, (b)는 900rpm일 때의 분무선단속도를 표시하고 있다. 500rpm의 경우 분사압력의 영향은 미세하지만 900rpm의 경우 분무선단속도는 분사압력이 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 분사 후 어느 시간(약 0.66ms)에서 분무선단속도가 최대를 보이고 있으며, 이를 기준으로 초기에는 증가하다가 후반에 감소하는 경향

을 보이고 있다. 이는 분사속도의 증가에 따라 운동에너지의 증대로 속도가 커지고, 또한 약 0.66ms까지 액주형태를 유지함을 의미한다. 즉 초기분무시 운동에너지의 중첩, 즉 초기 분무군에 후속분무군이 중첩되어 축방향속도를 증가시키다가 0.6~0.7ms상태에 이르러서 이런 영향이 적어지고, 또 주변공기의 저항으로 본격적으로 분열이 시작되어 선단속도가 감소됨을 알 수 있다.

3.2 분무특성에 미치는 분위기 압력의 영향

Fig. 8은 분위기압력이 분무각에 미치는 영향을 표시한 그래프이다. (a)는 분사압력 10MPa인 경우이며, (b)는 분사압력 18MPa인 경우이다. 분위기압력은 $P_a=3\text{MPa}$, 4MPa , 5MPa 로 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 분위기압 증가에 따라 분무각은 증가하고 있으나, 분무각 변화는 분위기압력이 변하여도 분무 초기에는 급격히 작아지다 후기에는 거의 일정한 경향을 보이고 있다.

Fig. 9는 분위기 압력이 분무도달거리에 미치는 영향을 표시한 그래프이다. 실험결과로부터 분무도달거리 형태는 거의 비슷한 경향을 보이고 있으나, 분위기 압력이 증가할수록 10MPa, 18MPa 모두 도달거리가 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 분위기 밀도의 증가가 축방향 속도를 반경방향 속도로 변환하는데 기여하기 때문이라 생각된다.

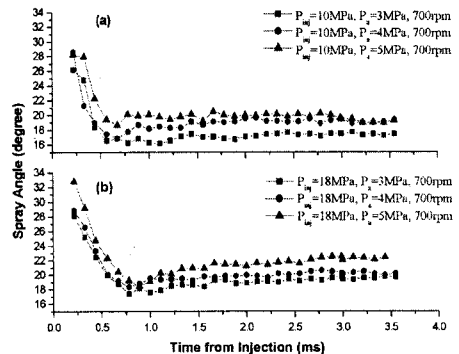


Fig. 8 Effect on Ambient Pressure on Diesel Spray Angle

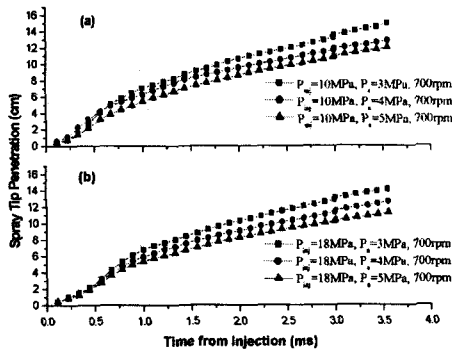


Fig. 9 Effect on Ambient Pressure on Diesel Spray Tip Penetration

Fig. 10은 분사압력 18MPa일 때 분위기압력 3, 4, 5MPa인 경우의 가시화 사진의 외곽선을 재합성한 그림이다. 분위기압력이 상승함에 따라 반경방향 분무외곽선의 간격이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 분무각의 증가와 분무도달거리의 감소의 결과로 나타난다.

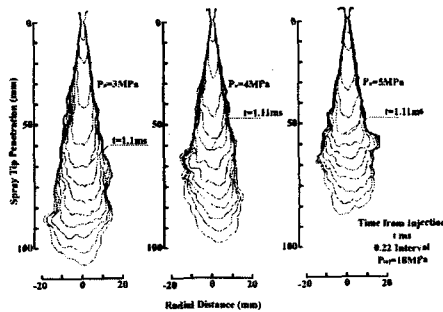


Fig. 10 The outline of Diesel Spray Photographs ($P_{inj}=18MPa$).

3.5 분무특성에 미치는 분위기 온도의 영향

분위기 온도가 분무특성에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 분위기 밀도 18, 30 kg/m^3 인 조건으로 각각 온도를 293K, 473K로 변화를 주어 실험을 하였다.

Fig. 11에서와 같이 분위기 온도에 따른 분무도달거리의 특성은 온도가 증가할수록 분무도달거리는 작게 나타났다. 또한 0.75~0.8ms 이전까지는 거의 비슷하였으나 0.8ms 이후에서 온도에 따른 경향이 뚜렷이 나타났다. 293K 대비 473K

의 경우 도달거리가 현격히 줄어들고 분위기 밀도가 커진 경우에 있어서는 분무초기부터 그 경향이 나타남을 알 수 있다. 이는 같은 밀도에서 분위기 온도 증가는 미세 액적들의 초기 증발로 이어지고 점차 액적증발이 본격화되어 분무가 관통력을 상실하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 12에서 보는 바와 같이 동일밀도조건에서 분위기 온도의 증가는 분무각의 증가를 가져온다. 이는 온도의 영향으로 연료가 증발되고 이는 분무운동량 감소로 이어져 분무가 관통력을 상실하여 반경방향으로 퍼지기 때문으로 판단된다.

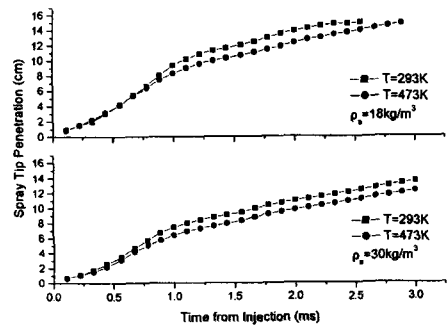


Fig. 11 Change of Spray Tip Penetration with the Temperature (293,473K) for the Ambient Density(18, 30 kg/m^3), Injection Pressure (14MPa), Rpm (700 rpm)

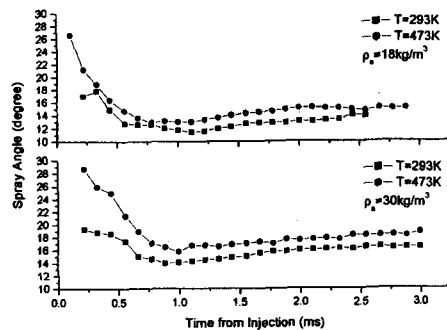


Fig. 12 Change of Spray Angle with the Ambient Density(18, 30 kg/m^3) for the Temperature (293, 473K) Injection Pressure (14MPa), Rpm (700 rpm)

4. 결 론

본 실험에서 핀틀형 노즐과 고온고압용기를 사용하여 실제기관과 근접한 조건에서 분무거동에 미치는 주위압력과 노즐분사압력, 그리고 회전수의 상관관계를 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 분사압력이 증가하면 분무각은 감소하나 압력을 더 증가시켰을 때 분무각은 커지는 것을 알 수 있으며 압력 증가시 분무도달거리와 분무선단 속도는 증가한다.
2. 분위기압력은 분무특성에 크게 영향을 미친다. 즉, 분위기 압력이 증가하면 분무각은 증가하나, 분무도달거리는 감소하였다.
3. 분위기 온도가 증가할수록 도달거리는 초기에 비슷하지만 천이점 이후에는 작아짐을 알 수 있다. 또한 분무각은 2~3° 증가하였다.

참 고 문 헌

- (1) Constantine Arcoumanis, "Spray Characterization in Direct-Injection Diesel Engines," International Symposium Advanced Spray Combustion, ISASC, pp.91-108, Hiroshima, 1994.
- (2) Dennis 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) Kyu-Keun Song, Hiroyuki Hiroyasu, and Takuo Yoshizaki, "Three-Dimensional Spray Distributions in a Direct Injection Diesel Engine", SAE Paper 941693.
- (5) H. Hiroyasu, T. Kadota and S. Tasaka, "Penetration of Diesel Fuel Sprays", Trans. of JSME, Vol 44, No. 385, 1978.
- (6) 김강출, 안진근, 송규근, 디젤노즐의 분무 거동에 관한 연구" 자동차공학회는문집 5권6

호, pp120-127, 1997.

- (7) J. Y. Koo, J. K. Martin, "Droplet Size and Velocity in a Transient Diesel Fuel Spray", SAE paper 900397.
- (8) R. D. Reitz and F. B. Bracco, "On the Dependence of Spray Angle and other Spray Parameters on Nozzle Design and Operation Conditions", SAE paper 790494.
- (9) Hiroyasu H., and Arai M., "Fuel Spray Penetration and Spray Angle in Diesel Engines," Trans. JSME, Vol. 21, 1980, pp.5-11.
- (10) Hiroyasu H., and Arai M., "Structures of fuel sprays in diesel engines," SAE paper 900475.