

디젤분무 특성에 미치는 분사인자의 영향

송규근† · 심상철** · 정병국* · 안병규*** · 김장현**** · 정재연*
(원고접수일 : 2004년 월 일, 심사완료일 : 2004년 월 일)

Effect of Injection Parameters on Diesel Spray Characteristics

Kyu-Keun Song† · Song-Cheol Sim** · Byung-Kook Jung* · Byoung-Kyu Ahn*** ·
Jang-Hein Kim**** · Jae-Yeon Jung*

Abstract : The characteristics of diesel spray have effect on the engine performance such as power, fuel consumption and emissions. Therefore, This study was performed to investigate the effect of various injection parameters. In this study, the experiment is performed by using the high temperature and high pressure chamber. Spray behaviors are visualized by using the high speed camera and spray angle, penetration etc. are measured.

Experimental results are summarized as follows:

1) Correlations of spray penetration is expressed as follows

$$0 < t < t_b ; S_1 = 11.628 \Delta P^{0.485} \rho_a^{-0.478} t^{1.337}$$

$$t_b < t ; S_2 = 7.457 \Delta P^{0.523} \rho_a^{-0.382} t^{0.548}$$

2) Correlations of spray Angle is expressed as follows

$$T_a = 293K : \tan(\theta/2) = 0.59(\rho_a/\rho_f)^{0.437}$$

$$T_a = 473K : \tan(\theta/2) = 0.588(\rho_a/\rho_f)^{0.404}$$

3) The measured macro characteristics - spray tip penetration and spray angle - agreed well with established correlations.

Key words : Spray tip penetration(분무도달거리), Ambient gas density(주위 밀도), Ambient gas temperature(주위 온도), Spray angle(분무각)

1. 서 론

디젤기관은 열기관 중에서도 열효율이 높을 뿐

만 아니라 다종의 연료를 사용할 수 있고, 내구성 및 신뢰성이 우수한 장점을 가지고 있어 자동차시 장에서도 매우 중요한 위치를 점하고 있다.

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

* 전북대학교 자동차신기술연구센터

** 전북대학교 대학원

*** 전라북도 자동차부품산업혁신센터

**** 현대자동차 파워트레인연구소

그러나 NO_x와 입자상 물질 등의 배출로 인한 대기오염에 심각한 문제를 발생하는 단점을 가지고 있다.

이러한 문제점을 규명, 해결하기 위해서는 복잡한 디젤기관 내 연소실의 직접적인 관측이 필요하다. 실험상의 어려움으로 정적용기에서의 분사된 분무의 거시적, 미시적 거동을 밝히는 연구가 최근까지 많이 수행되고 있다^{(1)~(9)}.

디젤 분무와 관련된 국내의 연구는 대부분이 상온에서 실험이 수행되고 있어 고온, 고압에서의 분무특성 평가는 부족한 상태이다⁽⁶⁾. 분사 인자가 분무특성에 미치는 상관관계에 대한 연구, 고찰이 아직도 많이 부족한 실정이다. 또한, 분무 메카니즘은 매우 복잡하기 때문에 이론적인 수식은 현재까지도 완전히 정립되어 있지 않으며, 실험을 통한 상관관계식들이 제안되고 있다^{(2),(5),(7),(8),(10)}.

본 연구에서는 실제 엔진 작동조건을 재현하기 위해 고온·고압용기를 설계·제작하여 주위밀도와 주위온도를 변수로하여 분무실험을 수행하였다. 실험으로부터 분무도달거리, 분무각 등의 분무특성을 파악하였으며, 각 종 실험 인자가 분무특성에 미치는 상관관계식을 도출하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 실험장치는 디젤기관의 자유분무를 관찰, 촬영하여 해석할 수 있도록 연료분사장치, 고온·고압용기, 가시화시스템으로 구성하였으며, Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타낸다.

연료분사시스템은 연료분사펌프, 위치검출센서, 구동모터, 솔레노이드 밸브 등으로 구성되었으며, 연료분사펌프는 4기통 in-line PE펌프로써 직경 9.5mm인 우권 리드형인 플런저를 사용하였다. 회전수 제어장치가 장착된 구동모터에서 캠의 상사점을 검출하여 동기신호원으로 하였으며, 솔레노이드 밸브에 의하여 래크를 작동시켜 연료를 1회 분사하였다.

실험에 사용된 노즐은 홀직경 1.02mm, 니들 들림량 0.45mm, 니들선단 편의 선각도는 10°인 단공 핀틀 상용노즐이다. Fig. 2는 본 노즐의 상세도이다.

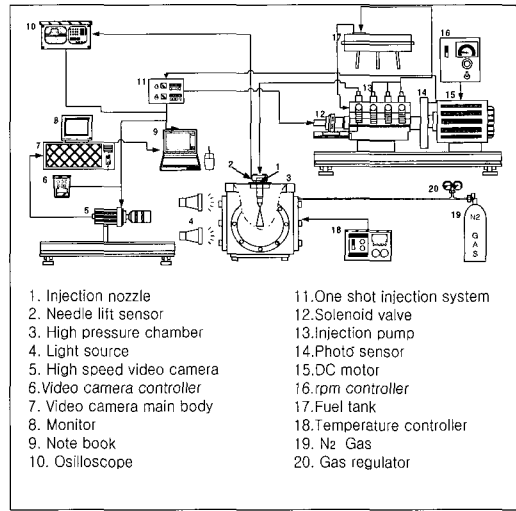


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

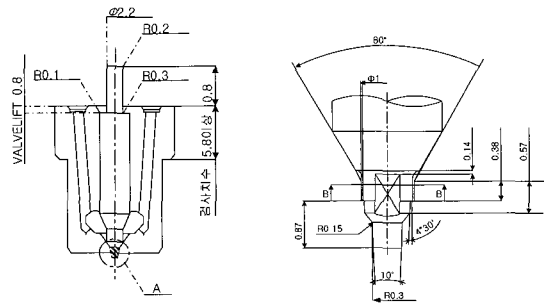


Fig. 2 Nozzle tip configuration

고온·고압 정용용기는 실제 디젤엔진에서와 같이 유사한 조건에서 분무의 특성을 관찰할 수 있도록 최고온도 693K, 최고 압력 5MPa까지 조절 가능 토록 설계·제작하였고, 투명 석영유리창을 3면에 설치하여 가시화가 가능하도록 하였으며, 용기내 압력은 N₂가스를 이용하여 조절하였다.

디젤 분무 촬영은 고속비디오 카메라 (FASTCAM ultima40K)를 사용하여 9000fps 획득하였으며, 단발분사장치의 신호를 동기원으로 사용하여 작동하도록 하였다.

분무 구조는 주로 SMD 측정^{(1),(6),(11)}, 분열길이 측정^{(2),(10),(12)}, 분무도달거리 및 분무각 측정^(1~9) 등을 통해 연구되고 있으며, 분무특성에 영향을 미치는 주요인자로는 분사노즐, 분사압력, 주위밀도, 주위온도 등이 있다.

본 연구에서는 선행적으로 분사압력과, 분사펌프 회전수가 분무 특성에 미치는 영향에 대한 연구를 수행한 실적이 있으며^[9], 본 연구에서는 분사압력(14MPa)을 고정시킨 상태에서 주위 밀도(18, 24, 30 kg/m³)와 주위온도(293, 473K)를 주요 인자로 하여 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분무의 구조

본 실험에서 정의한 분무의 구조를 Fig. 3에 나타낸다. 분무도달거리는 노즐팁으로부터 분사 후 진행한 분무선단까지의 거리로 정의하였고, 분무 각 θ 는 최대반경을 갖는 분무의 최외곽점과 노즐팁이 이루는 각으로 정의하였다.

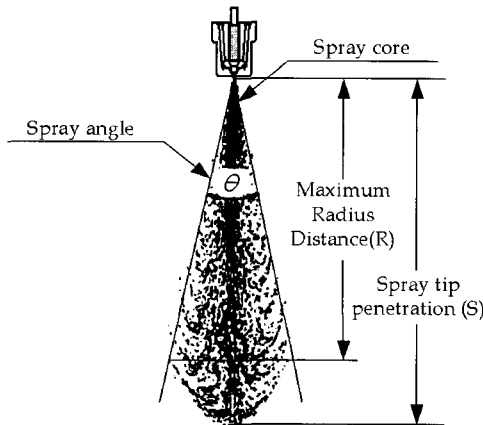


Fig. 3 Definition of diesel spray characteristics

Fig. 4는 주위 밀도 $\rho_a = 30 \text{ kg/m}^3$, 주위온도 $T_a = 293\text{K}$, $T_a = 473\text{K}$ 일 때의 고속비디오카메라로 가시화 한 분무사진이다. 각 분무사이의 시간 간격은 0.22 ms이며, 총 2.22 ms동안 연속 촬영한 분무사진이다. 시간이 지남에 따라 분무는 축방향 및 반경방향으로 발달하고 있으며, 축방향으로의 증가는 분무 초기에는 크고, 후반에는 완만한 구조를 보인다. 또한 상온과 고온의 경우 모두 주위 밀도가 커질수록 분무도달거리는 현저히 감소하고, 분무각은 약간 증가하는 구조를 보인다.

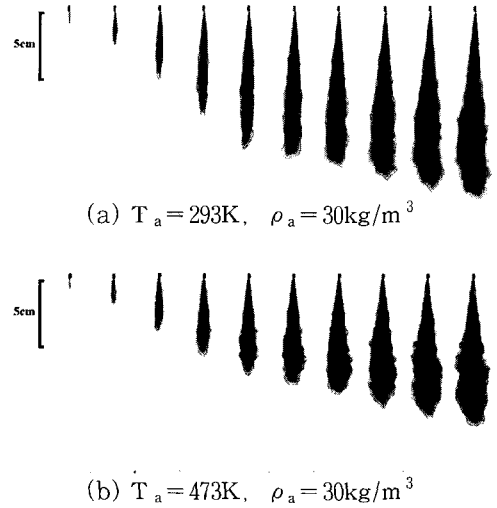


Fig. 4 The effect of the ambient gas temperature and density on spray structure

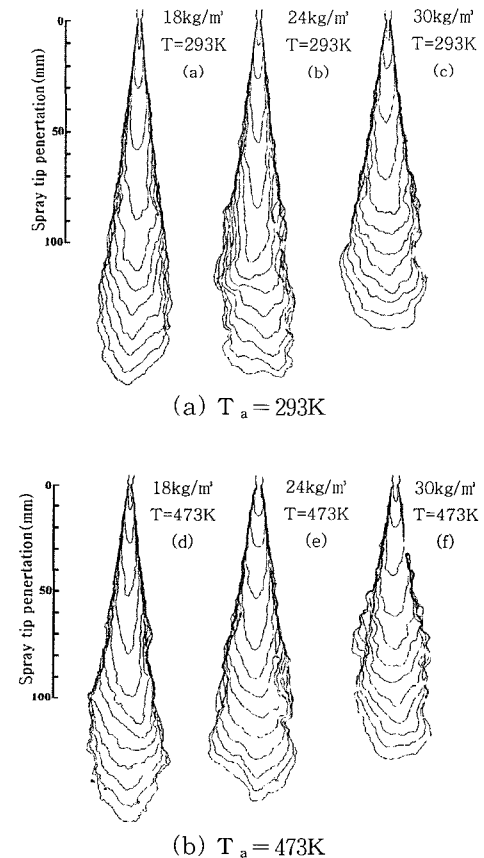


Fig. 5 Contour lines of diesel spray by time variation

Fig. 5는 실험으로부터 획득되어진 분무사진으로부터 이미지 처리기법을 이용하여 얻은 각 시간에 대한 ($\Delta t=0.22ms$) 분무의외곽형상 그림이다.

3.2 분무도달거리 특성

시간 변화에 대한 분무도달거리는 연소기의 설계, 연소특성에 밀접하게 영향을 미친다. 본 실험을 통해 획득한 주위 온도와 밀도 변화에 따른 분무도달거리 특성에 대한 실험 결과를 Fig. 6에 보인다. 분무도달거리는 주위 온도 및 밀도 변화에 관계없이 0.6~0.8ms 부근에서 기울기가 감소하는 것을 확인 할 수 있었는데, 분무가 액주형태에서 액적의 형태로 변하게 되는 분열(break-up)지점으로 판단된다.

주위밀도가 증가하거나, 주위 온도가 증가할수록 분무도달거리는 감소하는 특성을 보인다. 이는 주위 밀도가 증가할수록 고온·고압용기 내부의 압력이 상승함으로 인하여 분무의 성장을 방해하기 때문이고, 주위온도 증가에 대하여 분무도달거리가 감소하는 이유는 미세액적들의 초기증발 및 미립화가 빨라져 분무선단의 미립화된 액적들의 운동에너지가 감소되기 때문이다.

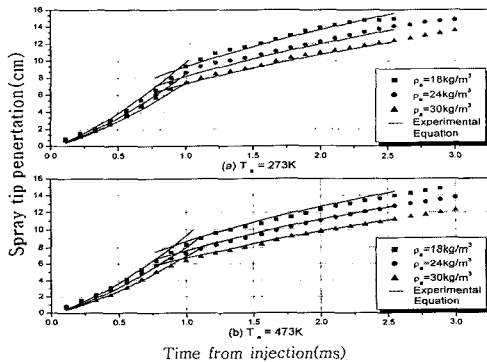


Fig. 6 Spray tip penetration at various operating condition

3.3 분무각 특성

분사 개시 후 시간변화에 대한 분무각 실험결과를 Fig. 7에 보인다. 분무각은 분사초기에 18°에서 30° 정도 큰 분무각을 가지다가 분열이 발생하는 부근에서 일정한 값을 가지는 경향을 보인다.

또한 주위 밀도와 온도증가에 대하여 분무각이 증가하는 현상을 보인다. 이는 주위밀도가 증가 할수록 분무의 성장이 느려지는 반면, 반경방향으로의 퍼짐이 증가하기 때문이고, 주위 온도에 대해서는 온도상승으로 인한 팽창 효과와 증발에 의해 액적 운동량이 감소하기 때문으로 판단된다.

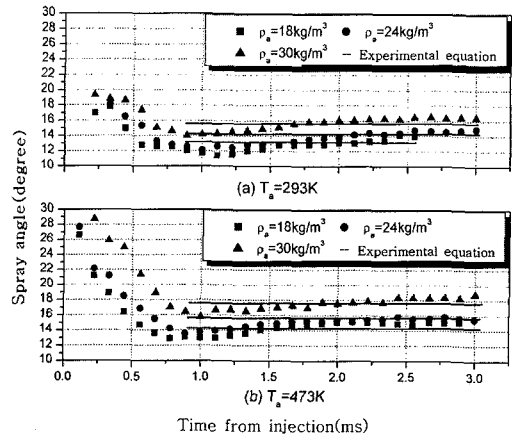


Fig. 7 Spray angle at various condition

4. 분무상관관계 고찰

실험을 통한 분무상관관계는 최근까지 여러 연구자들에 의해서 제안되어졌고^{(2), (5), (7), (8), (12)} 본 연구결과와는 정성적으로는 유사한 경향을 보였으나, 정량적으로는 다소 큰 차이를 보였다. 따라서 본 실험을 통한 결과로부터 커브피팅을 통해 분무도달거리와 분무각에 대한 상관관계를 도출 하였다.

4.1 분무도달거리의 상관관계고찰

Fig. 8은 주위 밀도 및 온도 변화에 따른 전 분사기간 중의 분무 도달거리를 대수좌표로 나타낸 것으로, 시간의 증가에 따라 분무도달거리는 증가하고 있으며, 분열 전후에 대하여 분무도달거리 (S_1, S_2)는 식(1), (2) 와 같이 시간변화에 대한 함수로 나타내었다.

$$0 < t < t_b ; S_1 = \alpha t^{1.337} \quad (1)$$

$$t_b < t ; S_2 = \alpha t^{0.548} \quad (2)$$

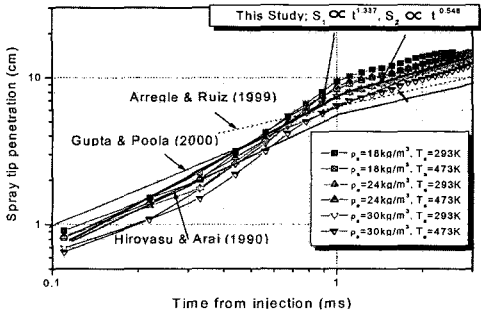
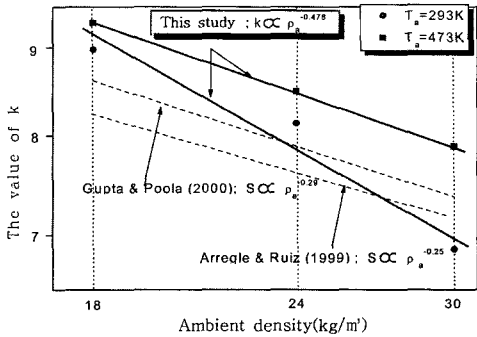
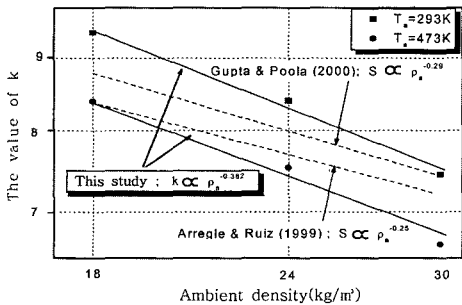


Fig. 8 The effect of the time on spray tip penetration

여기에서의 x 는 분무의 운동량과, 주위 밀도, 점도, 온도의 함수로써 본 실험조건에 있어서는 $x = f(P_a, P_i, T_a, \rho_a)$ 이다. 이 실험변수로 인하여 각 실험조건에서의 x 값은 각기 다른 값을 가지며, 주위 밀도가 분무특성에 미치는 영향은 x 값과 밀도와의 함수관계를 고려하여 상관관계를 구하였다. 분열 전후에 있어서 주위 밀도가 분무특성에 미치는 영향을 Fig. 9에 나타낸다.



(a) Before break-up



(b) After break-up

Fig. 9 The effect of the ambient density on spray tip penetration

이 결과로부터의 상관관계식은 다음과 같다.

$$0 < t < t_b ; x = x_1 \rho_a^{-0.478} \quad (3)$$

$$t_b < t ; x = x_1 \rho_a^{-0.382} \quad (4)$$

식(3), 식(4)의 x_1 은 실험변수인 주위 온도를 포함하는 항으로서, 주위 온도가 분사특성에 미치는 영향은 압력차의 항으로 표현이 가능하다. 이상상태방정식에 의해 계산된 분사압력과 주위 압력차를 Table 1에 보인다. x_1 은 Table 1에 보이는 압력차의 항으로 표현이 가능하며, 식(5)와 같이 표현된다.

Table 1 Pressure drop between injection pressure and ambient pressure(ΔP)

ρ_a \ T_a	293K	473K
18kg/m ³	12.44 (MPa)	11.48 (MPa)
24kg/m ³	11.92 (MPa)	10.64 (MPa)
30kg/m ³	11.4 (MPa)	9.8 (MPa)

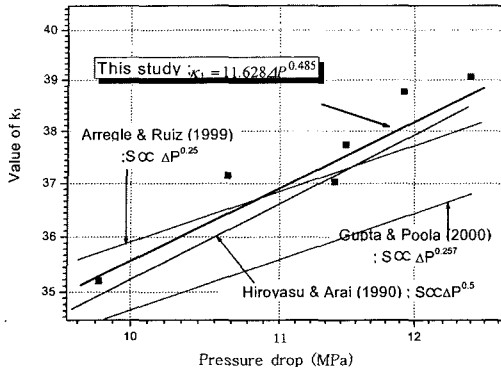
$$x_1 = x_2 \Delta P^A \quad (5)$$

여기에서, x_2 는 본 실험인자를 모두 빼낸 항이 되므로, 최종적으로 상수만 존재하게 되고, 압력차에 미치는 영향은 분열 전과 분열 후에 있어서, 그 지수가 각각 0.485 및 0.523임을 확인하였으며, 결과를 Fig. 10에 보인다.

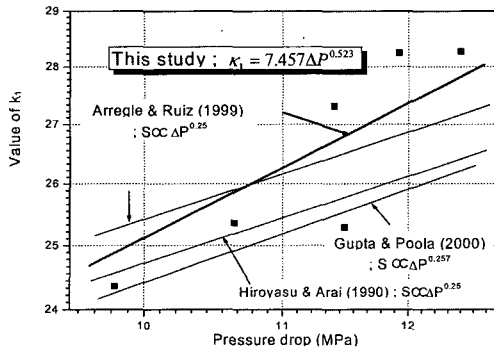
전술한 결과들로부터 각 실험 인자 들이 미치는 영향을 살펴본 결과 분무 도달거리는 분열 전후에 있어서 다음과 같은 상관관계가 있음을 알 수 있었으며, 실험결과와 계산결과를 Fig. 11에 보인다.

$$0 < t < t_b ; S_1 = 11.628 \Delta P^{0.485} \rho_a^{-0.478} t^{1.337} \quad (6)$$

$$t_b < t ; S_2 = 7.457 \Delta P^{0.523} \rho_a^{-0.382} t^{0.548} \quad (7)$$



(a) Before break-up



(b) After break-up

Fig. 10 The effect of the pressure drop on spray tip penetration

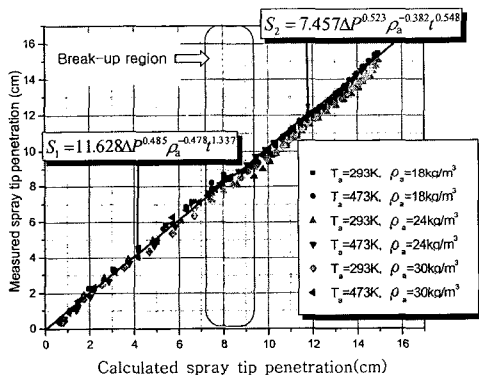


Fig. 11 Correlation fit through measured spray tip penetration data

4.2 분무각 상관관계 고찰

디젤 분무의 분무각에 영향을 미치는 가장 큰 인

자로는 주위 밀도이고, 주위 밀도를 주요인자로 하여 상관관계를 고찰하는 연구들이 많이 진행되고 있다.

분무각은 Fig. 7 결과에서 알 수 있듯이 분사초기에 큰 분무각을 가지다가 분사후반으로 갈수록 일정한 값을 갖는다.^{[10],[11]}

분무각의 상관관계는 분열 후(0.89ms < t) 분무각의 평균값을 기준으로 하여 고찰하였다.

Fig. 12에 분무각과 주위 밀도의 상관관계를 보인다.

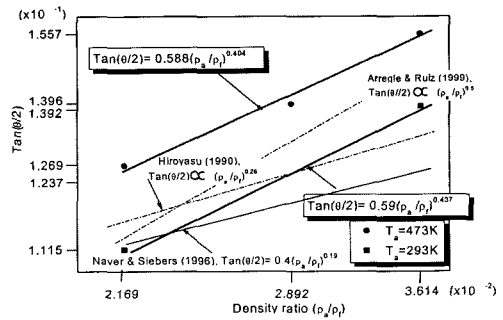


Fig. 12 The effect of the ambient density on spray angle

Fig. 12의 결과로부터 각각의 온도조건에 따른 분무각의 실험식은 다음과 같다.

$$T_a = 293K : \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = 0.59\left(\frac{\rho_a}{\rho_f}\right)^{0.437} \quad (8)$$

$$T_a = 473K : \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = 0.588\left(\frac{\rho_a}{\rho_f}\right)^{0.404} \quad (9)$$

5. 결 론

본 연구는 디젤엔진에서의 핀틀노즐의 자유분무 특성을 규명하기 위해 in-line 4 기통 펌프, 고속 비디오카메라, 고온·고압용기를 사용하여 주위 온도와 주위 밀도가 분사특성에 미치는 영향을 고찰 하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

[1] 전체적인 분무도달거리는 분열을 기준으로 해

서 크게 2형태의 기울기를 가지며, 다음과 같은 상관관계를 갖는다.

$$0 < t < t_b ; S_1 = 11.6284P^{0.485} \rho_a^{-0.478} t^{1.337}$$

$$t_b < t ; S_2 = 7.4574P^{0.523} \rho_a^{-0.382} t^{0.548}$$

- [2] 분무각은 분사초기 큰 분무각을 가지다가 분열 후 일정한 값으로 수렴하는 구조로 변하며, 각각의 온도에서 다음과 같은 상관관계를 보인다.

$$T_a = 293K : \tan(\theta/2) = 0.59(\rho_a/\rho_f)^{0.437}$$

$$T_a = 473K : \tan(\theta/2) = 0.588(\rho_a/\rho_f)^{0.404}$$

- [3] 주위 밀도와 주위 온도는 디젤분사특성에 영향을 미치는 주요 인자임을 실험을 통해 확인할 수 있었으며, 제안된 상관관계식은 실험결과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구는 전북대학교 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

[1] Z. Huang, L. F. Zhang and B. Z. Li, "The Laser Holographic Study on Fuel Atomization of Diesel Spray", COMODIA 90, pp. 303-308, 1990.

[2] D. Naber and L. Siebers, "Effects of Gas Density and Vaporization on Penetration and Dispersion of Diesel Sprays", SAE 960034.

[3] 임경훈, 이봉수, 김종현, 구자예 "고온·고압 환경에서 가열평판에 충돌하는 디젤분무의 특성", 대한기계학회논문집, 제25권, 제5호, pp. 627-633, 2001.

[4] L. Dennis, "Liquid-Phase Fuel Penetration in Diesel Sprays", SAE 980809.

[5] L. Araneo, A. Coghe, G. Brunello and G. E. Cossali, "Experimental Investigation of Gas Density Effects on Diesel Spray Penetration and Entrainment", SAE 1999-01-0525.

[6] 김종현, 이봉수, 이장희, 구자예, "개변압 및 배압변화가 디젤 분무의 초기 미립화 특성에 미치는 영향", 한국 자동차 공학회 논문집, 제 7권, 9호, pp. 56-62, 1999.

[7] J. Arregle, J. V. Pastor and S. Ruiz, "The Influence of Injection Parameters on Diesel Spray Characteristics", SAE 1999-01-0200.

[8] S. Gupta, R. Poola and R. Sekar, "Injection Parameter Effects on Diesel Spray Characteristics", SAE 2000-01-2787.

[9] 송규근, 정재연, 정병국, 안병규, 오은택, "고온·고압용기내에서 핀틀노즐의 분무특성에 관한 실험적연구", 한국박용기관학지, 제27권, 제1호, pp. 057-064, 2003.

[10] H. Hiroyasu, T. Kadota and S. Tasaka, "Study of the Penetration of Diesel Spray", Trans. JSME, Vol. 34, No. 385, 1978.

[11] K. Takeuchi, J. Senda and M. Shikuya, "Transient Characteristics of Fuel Atomization and Droplet Size Distribution in Diesel Fuel Spray", SEA830449.

[12] M. Arai and M. Takahara, "Disintegrating Process and Spray Characterization of Fuel Jet Injected by a Diesel Nozzle", SAE840275.

저 자 소 개



송규근 (宋圭根)

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



심상철 (沈相喆)

1976년 6월생, 2002년 원광대학교 졸업, 현재 전북대학교 대학원(석사).



정병국 (鄭秉國)

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



안병규 (安炳奎)

1975년 8월생, 2001년 전북대학교 졸업, 2003년 전북대학교 대학원 졸업(석사), 2003. 4~2004. 8 한국기계연구원 첨단산업기술연구부 연구원, 2004. 8~현재 전라북도 자동차 부품 산업혁신센터 연구원.



김장현 (金壯攄)

1966년 10월생, 1989년 전북대학교 졸업, 1991년 전북대학교 대학원 졸업(석사), 1998년 일본 히로시마대학교 대학원 졸업(박사), 1998년 3~현재 현대자동차 파워트레인연구소.



정재연 (鄭材鍊)

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