

커먼레일시스템의 비증발 디젤 분무에서 분사율과 주변기체의 밀도에 따른 주변기체 유입

공 장 식¹⁾ · 최 욱¹⁾ · 배 충 식^{*1)} · 강 진 석²⁾

한국과학기술원¹⁾ · 현대자동차²⁾

Effect of Injection Rate and Gas Density on Ambient Gas Entrainment of Non-evaporating Transient Diesel Spray from Common-Rail Injection System

Jangsik Kong¹⁾ · Wook Choi¹⁾ · Choongsik Bae^{*1)} · Jinsuk Kang²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

²⁾Powertrain Research, Hyundai-Motor, 772-1 Changduk-dong, Whasung-si, Gyeonggi 445-706, Korea

(Received 4 May 2004 / Accepted 20 July 2004)

Abstract : Entrainment of ambient gas into a transient diesel spray is a crucial factor affecting the following preparation of combustible mixture. In this study, the entrainment characteristics of ambient gas for a non-evaporating transient diesel were investigated using a common-rail injection system. The effects of ambient gas density and nozzle hole geometry were assessed with entrainment coefficient. Laser Doppler Velocimetry (LDV) technique was introduced to measure the entrainment speed of ambient gas into a spray. There appeared a region where the entrainment coefficients remained almost constant while injection rates were still changing. The effect of common-rail pressure, which altered the slope of injection rate curve, was hardly noticed at this region. Entrainment coefficient increased with ambient gas density, that is, the effect of ambient gas density was greater than that of turbulent jet whose entrainment coefficient remained constant. The non-dimensional distance was defined to reflect the effect of nozzle hole diameter and ambient gas density together. The mean value of entrainment coefficient was found to increase with non-dimensional distance from the nozzle tip, which would be suggested as the guideline for the nozzle design.

Key words : Common-rail injection system(커먼레일 분사시스템), Injection rate(분사율), Entrainment(유입), Entrainment coefficient(유입계수)

Nomenclature

D_0 : orifice diameter(mm)
 K : entrainment coefficient
 m_{inj} : amount of fuel injected per nozzle hole
 \dot{m}_e : mass flow rate of entrained ambient gas
 \dot{m}_o : mass flow rate of injected fuel

P_{rail} : common-rail pressure
 t : time
 V_{inj} : injection velocity
 Z : distance from the nozzle
 ρ_c : ambient gas density
 ρ_0 : fuel density

1. 서론

HSDI(High Speed Direct Injection) 디젤엔진에서

*To whom correspondence should be addressed.
csbae@kaist.ac.kr

분무의 특성은 엔진의 성능과 직결되기 때문에, 디젤분무의 특성을 이해하고 제어하기 위한 연구는 계속되고 있다. 현재까지 제시된 디젤 분무의 모델들은 대부분 정상상태 분사조건 가정하에서 분무 거동을 예측하고 있으나, 실제 HSDI엔진에서 짧은 분사기간동안 분사율이 정상상태가 되는 것은 거의 불가능하다. 뿐만 아니라, 노즐로부터 피스톤 보울(bowl)까지의 거리는 분공크기의 140~170 배 정도¹⁾이므로, 완전발달(fully-developed)된 분무를 가정하여 예측하기에도 공간적인 제약이 따른다.

정상상태 가스제트이며 레이놀드수가 25000 이상인 경우에 대해서, Ricou와 Spalding²⁾은 주변기체의 유입률 K를 식 (1)과 같이 제시하였다.

$$K = \frac{\dot{m}_e(z) + \dot{m}_o}{\dot{m}_o} \left(\frac{D}{z}\right) \left(\frac{\rho_o}{\rho_e}\right)^{0.5} \quad (1)$$

여기서, \dot{m}_e 는 유입된 주변기체 질량유량, \dot{m}_o 는 노즐로 분사된 가스의 질량유량이고, D_0 는 분공의 크기이며, ρ_e, ρ_o 는 각각 주변기체와 분사된 기체의 밀도이다. 준정상상태(quasi-steady)인 경우에는 \dot{m}_o 가 상수이므로 유입계수 K는 0.32로 일정하였다. 또한, 그들은 실험변수 적용의 편의를 위하여 \dot{m}_e 를 직접 도입하는 대신, 식 (1)을 미분하여 수정유입계수인 식 (2)를 유도하였다.

$$K' = \frac{d\dot{m}_e}{dz} \left(\frac{D_0}{\dot{m}_o}\right) \left(\frac{\rho_o}{\rho_e}\right)^{0.5} \quad (2)$$

Hill³⁾은 분사된 가스제트의 단위길이 당 주변기체의 유입을 측정하여 식 (2)가 타당함을 보였다. 그는 또한 분무의 완전발달영역 (fully-developed region)에서는 K'가 0.32임을 입증하였다. 그러나 분무상류($Z < 14D_0$)의 경우 노즐로부터 거리가 증가할수록 K'값이 증가하는 현상이 관찰되었다.

Cho 등⁴⁾은 스모크와이어(smoke wire)를 이용하여 디젤 분무주위의 유동을 가시화 하였다. 분무의 앞부분은 주변기체를 밀어내고 뒤따르는 부분은 주변기체를 유입하는 현상을 관찰하였다.

Cossali 등^{5,6)}은 LDV를 이용하여 디젤 분무로 유입되는 기체의 속도를 측정하였으며, 분사압력의 변화에 따른 유입특성을 유입계수 K'로써 정리하였다. 뿐만 아니라, 주변기체의 압력과 온도에 따라 주

변기체의 유입 특성을 연구하였는데, 제한적인 조건($Z < 200D_0, \rho_a < 7.02 \text{ kg/m}^3, T_{air} < 413 \text{ K}$)에서 유입계수 K'는 일정한 상수로 수렴되지 않았다. 그러나 노즐로부터 거리가 증가할수록 유입계수 K' 또한 증가하였으며, 그들은 실험값으로부터 식 (3)을 유도하였다.

$$\frac{dm_e}{dz} = 0.044 \left(\frac{\dot{m}_o}{D_o}\right) \left(\frac{z+z_o}{D_o}\right)^{0.5} \left(\frac{\rho_e}{\rho_o}\right)^{0.81} \left(\frac{T_{air}}{T_o}\right) \quad (3)$$

Cho 등⁴⁾은 디젤 분무의 주변기체 유입이 난류정상 가스제트(turbulent steady gas jet)의 완전발달영역(fully developed region)에서 일어나는 것과 같다고 했는데, Cossali 등^{5,6)}은 그와 상반되는 결과를 제시하였다.

그러나, 이상의 결과들은 대부분 분무의 완전발달상태를 가정하거나, 비교적 긴 분사기간을 통해 분사율의 정상상태 도달 후에 도출된 결과들이라는 한계를 지니고 있다. 따라서, 본 연구에서는 분사율의 비정상특성을 포함한 커먼레일 시스템에서, 분사율과 분사압력, 그리고 분위기 밀도가 분무 주위 기체의 유입특성에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 구성 및 조건

2.1 실험장치 구성

실험에 사용된 보쉬 커먼레일(Bosch common-rail) 분사 시스템은 최고 135 MPa까지 가압할 수 있으며, 엔진회전속도 1200 rpm을 상정하여, 분사주기는 10 Hz로 설정하였다. 온라인으로 분사에 관련된 모든 조건을 변화시킬 수 있는 ECU 프로그램을 사용하였으며, 캠 축 및 크랭크축 속도센서만 추가하여 최소의 실험용 커먼레일 분사 시스템을 구성하였다.

본 연구에 사용된 세 개의 노즐은 이중가이드가 장착된 VCO(Valve Covered Orifice) 형식이다. 이 중 0.144 mm(5 hole)과 0.132 mm(6 hole) 노즐은 직선형 구조를 갖고 있으며, 나머지 하나는 테이퍼 가공(tapered, di=0.146 mm, do=0.126 mm, 6 hole) 되어 있다.

Fig. 1은 디젤분무로 유입되는 주변기체의 유입

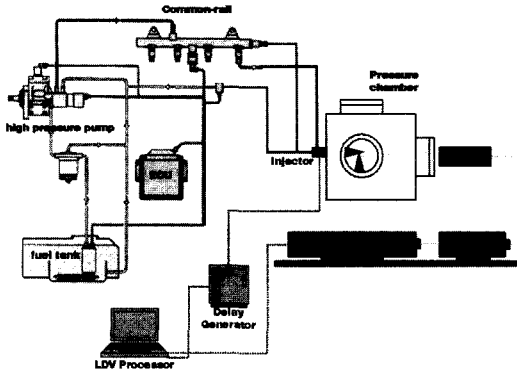


Fig. 1 Schematic diagram of system to measure entrainment velocity

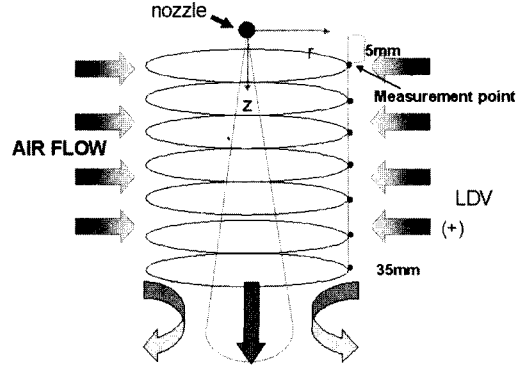


Fig. 2 The cylindrical control surface and measurement points used to evaluate the air entrainment

속도를 측정하기 위한 LDV(Laser Doppler Velocimetry) 실험장치의 개략도이다. 분무로 유입되는 공기 속도를 측정하기 위한 장치는 다음과 같이 구성되었다. 광원으로는 파장 514 nm의 Ar-ion레이저(Spectra-Physics, Stabilite2017)를 사용하였으며 초점거리가 362.2 nm인 광학렌즈를 사용하였다. 본 실험에서는 정면창을 통하여 레이저를 조사하고 후방산란(Backward scattering)방식을 이용하므로, 송광부와 수광부가 일직선 상에 놓이게 된다. 송광부는 개조한 3차원 밀링베드를 이용하여 정확한 위치에 놓일 수 있도록 설계되었다.

2.2 실험방법

디젤 분무로 유입되는 주변기체의 속도를 측정하기 위하여 Fig. 2와 같은 원통형 제어 표면(cylindrical control surface)에 LDV기법을 적용하였다. 본 실험에서는 여러 분공 중 하나의 분공에서만 분사되도록 노즐캡을 제작하였다. 분사는 10 Hz의 주기로 이루어졌으며 분사 후 고압분사실에 남아있는 미세한 연료 액적들을 추종입자(tracing particle)로 사용하였다. 분사 시작 전에 입자들이 떠다니는 속도는 실험결과에서 무시할 수 있음을 확인하였다.

주변기체가 디젤분무로 유입되는 경향이 분무축에 대칭이라고 가정하고 분무중심축으로부터 일정한 반경에서 반경방향의 유입속도를 측정하였다. 작은 반경을 선택하면 디젤 분무로부터 나오는 액적들이 측정점을 지나가 속도측정값에 영향을 줄 수 있으며, 반대로 너무 큰 반경을 설정하면 속도가

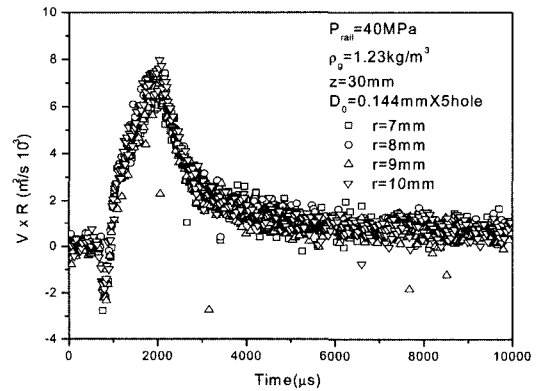


Fig. 3 The product of the mean radial velocity and the radial distance to define the radius of control surface ($P_{rail}=40\text{MPa}$, $D_0=0.144\text{mm}$, $z=30\text{mm}$, $\rho_g=1.23\text{ kg/m}^3$)

너무 작아 데이터에 대한 신뢰성이 많이 떨어진다.

Fig. 3은 노즐($D_0=0.144\text{ mm} \times 5\text{ hole}$)로부터 Z방향으로 30 mm 떨어진 지점에서 반경방향으로 유입되는 주변 기체의 유량을 다양한 반경에서 측정한 결과이다. 그래프의 수직축은 반경방향 속도와 제어 표면 반경의 곱으로 단위거리당 유입되는 주변기체의 유량 또는 운동량과 비례한다. 분무 중심으로부터 9mm 이상 떨어진 지점에서는 데이터들이 대부분 동일선상에 겹쳐짐을 관찰할 수 있는데, 이는 유입 유량과 제어표면의 반경이 무관함을 의미한다. 이러한 결과로부터 레일 압력이 40 MPa인 경우 제어 표면의 반경을 10mm로 정하였고 레일압력이 110 MPa인 경우는 제어표면의 반경을 12mm로 정하였다.

2.3 실험조건

본 연구에서 적용한 실험조건은 Table 1에 정리되어 있다. 앞에서 언급했듯이 규격 및 형식이 각기 다른 세 개의 노즐을 사용하였으며 커먼레일의 압력은 각각 40 MPa과 110 MPa, 그리고 주변기체의 밀도는 각각 1.23, 16.9, 33.8kg/m³이다.

Fig. 4는 분사율을 이용하여 측정한 각 노즐에서의 분사속도변화를 나타내며, 이를 통해 분무거동과 주변기체 유입과의 상관성을 검토할 수 있다.

Table 1 Experimental conditions

D ₀ (mm)	P _{rail} (MPa)	m _{in} (mg)	ρ _e (kg/m ³) at T _a =298 K
0.144 5hole	40	3.078	1.23 16.9 33.8
	110	3.754	
0.132 6hole	40	2.493	
	110	3.117	
0.146(in) 0.126(out) 6hole	40	2.595	
	110	3.307	

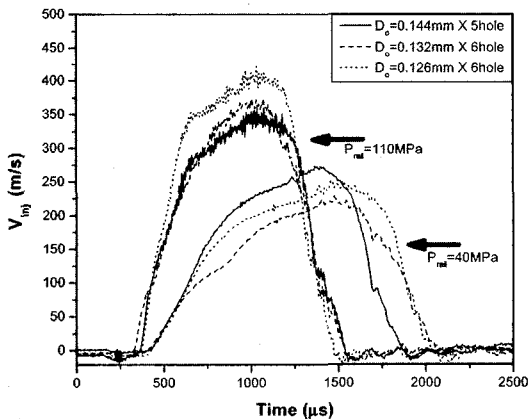
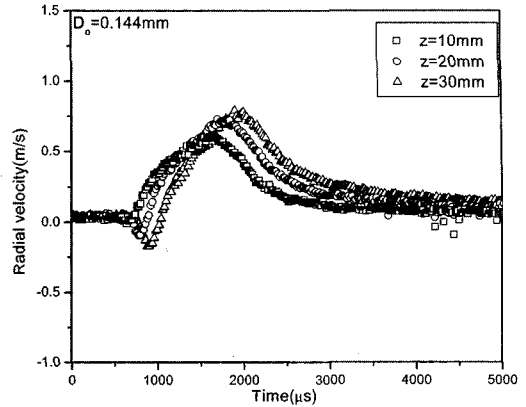


Fig. 4 Estimated injection speeds using the injection rate profiles

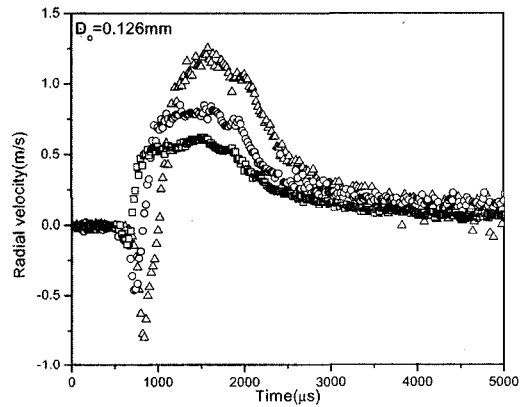
3. 결과 및 토의

3.1 유입속도의 변화

Fig. 5는 디젤분무를 향해 원통형 제어표면을 지나는 유입기체의 속도변화를 나타낸다. 분사개시 후 약 1000 μs 지점에서 반경방향의 속도가 음의 값을 갖는 것은 분무 선단에 이를 때 주변기체가 분무



(a)



(b)

Fig. 5 Entrainment velocity of ambient gas at 12mm from the spray axis in radial direction at common-rail pressure of 40 MPa and ambient gas density of 1.23 kg/m³ for two nozzle hole diameters [(a) D₀=0.144 mm, (b) D₀=0.126 mm]

선단에 의해 밀려남을 의미한다. 또한 분무 선단이 지나고 이어지는 주변기체의 유입속도의 변화는 분사율 변화와 유사함을 알 수 있으며, 노즐로부터 멀수록 분무유입 속도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 단위길이당 주변기체의 유입률은 거리의 함수이다. 그리고 주변기체의 유입속도는 분공경이 작을수록 증가함을 알 수 있으며, 노즐로부터 멀리 멀어질수록 경향은 보다 뚜렷해진다. 그러나 식 (2)에서는 주변기체의 유입률이 분공경에 비례하고 주변기체 압력의 제곱근에 반비례한다고 하였다. 이는 완전발달상태의 제트를 대상으로 유도된 식 (2)의 경우, 하류에서의 분무선단 속도는 분사속도에 거

의 무관하므로, 도리어 높은 운동량을 갖기 위해서는 보다 큰 노즐직경이 필요함을 의미하기 때문이다. 이와는 반대로, 분공경 및 분사율 등이 상이한 비정상 분사율을 갖는 본 연구의 실험조건에서는 초기 분무 운동량이 보존된다는 가정 하에 Fig. 4의 분사속도를 기반으로 계산할 경우, $d_0=0.126$ mm인 경우의 분무 운동량 ($\propto Ud_0^2$)이 높은 분사속도의 영향으로 $d_0=0.144$ mm의 경우보다 다소 큰 값을 갖는다. 분무의 축방향 운동량이 클수록 높은 압력차 (ΔP)를 유발하여 분위기 유입성향은 커지게 되므로, 결과적으로 Fig. 5의 결과는 단위분공당 분무의 운동량 차이로써 해명될 수 있다.

3.2 주변기체 유입률의 변화

식 (2)에서 정의한 수정유입계수 K' (이하 K)로써 분사율 변화에 따른 주변기체의 유입률을 나타낸다. 다만, 준정상상태 (quasi-steady)인 경우 연료의 분사량 m_0 는 정확히 알 수 있으나, 분사율이 변하는 디젤분무의 경우는 분사된 연료간의 운동량 교환 때문에 분무의 운동량을 시간과 거리의 함수로 표현하기가 매우 어렵기 때문에, 유입률 K 를 쉽게 계산하기 위해서 거리에 상관없이 노즐로 분사된 운동량이 보존된다고 가정하였다. 그러나 이러한 가정은 단지 노즐 근처에서만 가능하다. 이전 연구⁸⁾에서 밝힌 바 있듯이, 분사율로부터 초기 분무 도달거리는 예측 가능하므로 노즐에서 분사된 초기영역의 운동량 그래프는 비슷하다고 할 수 있다. 주변기체의 압력이 1.23 kg/m^3 인 경우는 초기 영역이 40 mm 정도이고 33.8 kg/m^3 인 경우는 8 mm까지이다.

Fig. 6은 분사율에 따른 주변기체의 유입률 K 를 나타내고 있다. 점선은 분사율 변화를 나타내며, 이들은 각각 5 mm와 35 mm에서 측정된 점에 상응하는 것이다. 대기압조건에서의 유입이 시작된 후 유입률 K 는 0.05~0.15사이에서 일정한 값을 유지하고 있으며, 분사율이 달라져도 유입률 K 의 변화는 크지 않다. 이러한 사실은 주변기체의 유입속도가 분사율곡선을 따르기 때문으로 판단된다. 분사 초기에 유입률이 음을 나타내는 것은 분무 선단이 주변기체를 밀어내기 때문이고, 분사 후반에 갑자기 유입률이 증가하는 이유는 분사속도는 급격히 감소하

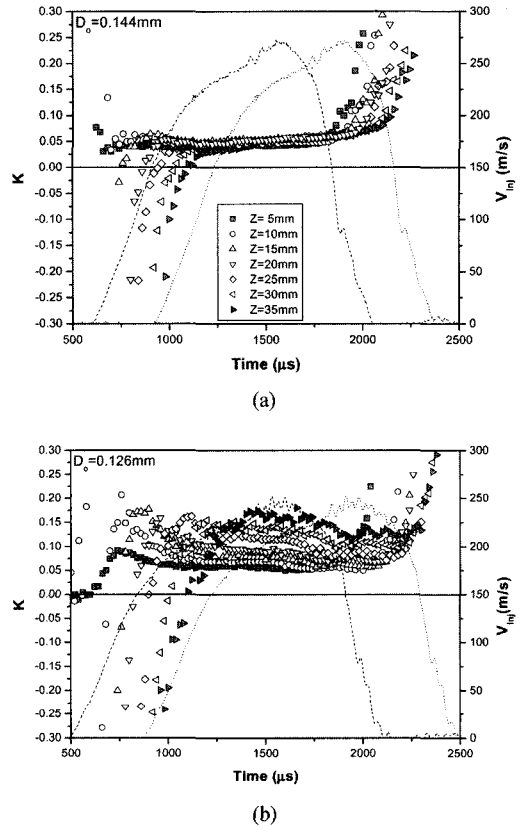


Fig. 6 Variation of entrainment coefficient versus injection rate and axial distance from the nozzle at common-rail pressure of 40 MPa and ambient gas density of 1.23 kg/m^3 for two different nozzle hole diameters [(a) $D_0=0.144$ mm, (b) $D_0=0.126$ mm]

더라도, 주변기체가 관성에 의해서 지속적으로 유입되기 때문으로 추정된다. 앞서 언급한 바와 같이, 분공경이 작을수록 단위분공당 분무의 운동량은 증가하므로, 유입률은 0.126 mm인 경우에 정량적으로 보다 높은 값을 나타내며, 이는 Fig. 5에 제시한 반경 방향 속도성분의 변화경향과 일치한다.

Fig. 7은 주변기체 평균유입률의 변화를 나타낸다. 유입률 평균은 분사기간 중 유입률이 일정하게 되는 구간 (분사기간의 중간, 약 1/3구간)의 평균값이다. 주변기체의 압력이 1.23 kg/m^3 인 경우는 모든 측정지점을, 16.9 kg/m^3 인 경우는 노즐로부터 15 mm까지 33.8 kg/m^3 은 10 mm까지 선택하였다.

주변기체 유입률 K 는 무차원거리(non-dimensional distance : $((z/D_0)(\rho/\rho_0))^{1/2}$)따라 증가하는 것

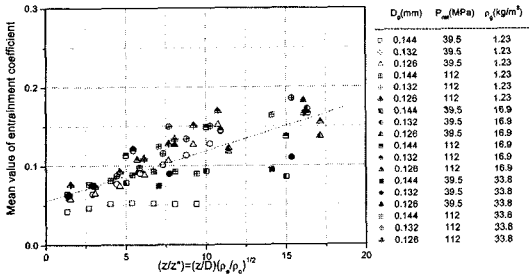


Fig. 7 Mean value of entrainment coefficient versus non-dimensional distance from the nozzle

을 볼 수 있다. 유입률과 무차원거리와 선형계수 약 0.75정도의 비례관계를 갖고 있다. 이러한 결과는 주변기체의 압력과 분공 크기에 영향을 받는 무차원거리가 증가할수록 유입률, 즉 공기와 연료의 비율이 증가함을 의미하며, 따라서 엔진 개발과정에서 중요한 설계 요소가 될 수 있다. 다시 말해, 터보차저를 이용하여 주변기체의 압력을 증가시키거나 분공경이 작은 인젝터를 장착하여 기하학적인 실제 거리는 일정하지만 무차원 거리를 증가시킴으로써 주변기체의 사용 효율을 증대시킬 수 있다.

4. 결론

LDV기법을 이용하여 커먼레일시스템에서 분사된 분무의 주변기체 유입률을 측정하였다.

- 1) 분무선단은 주변기체를 밀어내고, 이어지는 추종부분에 의한 주변기체의 유입은 분사울곡선의 변화경향을 따른다.
- 2) 주변기체의 밀도가 낮을 때, 비록 분사율이 변하더라도 주변기체가 유입되기 시작한 후 유입률은 일정하게 나타난다.
- 3) 분사초기의 디젤 분무 주변기체의 유입률은 무

차원거리(non-dimensional distance)에 따라 증가하며, 노즐부터의 거리, 주변기체의 압력에 제곱근, 분공크기에 반비례하여 증가한다.

References

- 1) H. Hiroyasu, M. Arai, "Structure of Fuel Sprays in Diesel Engines," SAE 900475, 1990.
- 2) F. P. Ricou, D. B. Spalding, "Measurement of Entrainment by Axisymmetrical Turbulent Jets," J. Fluid Mech., Vol.11, No.21, pp.21-32, 1960.
- 3) B. J. Hill, "Measurement of Local Entrainment Rate in the Initial Region of Axisymmetric Turbulent Air Jets," J. Fluid Mech., Vol.51, No.4, pp.773-779, 1972.
- 4) I. Y. Choi, H. Fujimoto, J. Y. Ha, H. Tanabe, G. T. Sato, "Similarity Law of Entrainment into Diesel Spray and Steady Spray," SAE 900447, 1990.
- 5) G. E. Cossali, G. Brunello, A. Coghe, "LDV Characterization of Air Entrainment in Transient Diesel Sprays," SAE 910178, 1991.
- 6) G. E. Cossali, A. Gerla, A. Coghe, G. Brunello, "Effect of Gas Density, Temperature on air Entrainment in a Transient Diesel Spray," SAE 960862, 1996.
- 7) L. Araneo, A. Coghe, G. Brunello, G. E. Cossali, "Experimental Investigation of Gas Density Effects on Diesel Spray Penetration and Entrainment," SAE 1999-01-0525, 1999.
- 8) J. S. Kang, C. S. Bae, "Initial Behaviors of Diesel Spray from Common-rail Considering Injection Rate Profile," 2002 KSAE Spring Conference Proceedings, Vol.I, pp.418-422, 2002.