한국동력기계공학회지 제9권 제4호 pp.209~213 2005년 11월

주위기체 밀도변화가 증발자유디젤분무의 혼합기형성과정에 미치는 영향

Effect of the Change in Ambient Gas Density on the Mixture Formation Process in Evaporative Free Diesel Spray

염정국 · 정성식
J. K. Yeom and S. S. Chung

Key Words : Ambient Gas(주위가스), Mixture Formation(혼합기형성), Evaporating Diesel Spray(증발디젤분무), ECD U2(전자제어디젤분사장치), Exciplex Fluorescence Method(엑시플렉스형광법)

Abstract : The effects of density change of ambient gas on mixture formation process have been investigated in high temperature and pressure field. To analyze the mixture formation process of evaporating diesel spray is important for emissions reduction in actual engines. Ambient gas density was selected as experimental parameter. The ambient gas density was changed from r_a=5.0kg/m^3 to r_a=12.3kg/m^3 with a high pressure injection system(ECD-U2). For visualization of the experiment phenomenon, a CVC(Constant Volume Chamber) was used in this study. The ambient temperature and injection pressure are kept as 700K and 72MPa, respectively. The images of liquid and vapor phase in the evaporating free spray were simultaneously taken by exciplex fluorescence method. As experimental results, with increasing ambient gas density, the tip penetration of the evaporating free spray decreases due to the increase in the drag force from ambient gas.

1. 서 론

디젤기관은 종래부터 직분식이 주류를 이루었고, 근래에는 분사압력의 고압화가 진행 중이다. 분사압력의 고압화에 의해 연소효율의 향상 및 배출가스 중의 입자상물질(PM : Particulate Matter)의 저감을 유도하고 있으나, 연소가스의 고온화로 인해 질소산화물(NOx : Nitrogen Oxides)은 증가한다. 따라서, 분사기간의 지연(Retard)이나 파일럿분사(Pilot injection)등의 혼합기제어에 의해 질소산화물의 저감을 꾀하고 있다. 이와 같이 디젤기관은 연료분사에 의한 혼합기형성의 최적화를 통하여 연소제어를 시도하는 수법이 중시되고 있는 실정이다. 이를 위해서는 디젤분무구조에 기초한 혼합기형성 기구의 규명이 매우 중요하다. 그러므로 본 연구에서는 보다 고도의 혼합기형성 제어를 위한 기초연구로서 고온·고압장에서 주위기체의 밀도 변화가 증발디젤자유분무의 혼합기형성에 미치는 영향을 해석한다. 디젤자유분무의 혼합기형성과정에 관한 연구에 는 Nishida[1]와 Dan[2]와 같이 비증발장에 있어서 주위밀도를 실험변수로 한 실험결과가 있지만, 실제 엔진 실린더 내에 분사된 연료는 상변화를 동반하므로, 본 연구는 고온·고압의 증발장에서 주위기체의 밀도변화가 디젤자유분무의 혼합기형성과정에 미치는 영향에 관하여 해석을 행하였다.

접수일 : 2005년 10월 18일
염정국(책임저자) : 동아대학교 기계공학부
E-mail : laser355@donga.ac.kr Tel. 051-200-7654
정성식 : 동아대학교 기계공학부

2. 실험방법

2.1 고온·고압 정용용기(CVC)

Fig. 1에 본 실험에 사용한 고온·고압용기의 개략을 나타낸다. 용기의 재질은 SS41이고, 설계압력은 3.4MPa, 최대사용압력은 3.0MPa이다. 고압용기에는 레이저 시트(Sheet)광 입사 및 관측용 유리창(F120, t45)이 서로 직각이 되도록 설치되어 있다. 유리는 자외선의 투과성 및 내열성을 고려해서 합성석영유리로 제작하였고, 또한 입사 레이저 광(355nm)의 감쇠를 막기 위하여 무반사 코팅을 하였다. 용기 내 체적은 분사된 분무체적보다도 훨씬 크므로 분무에 대한 용기 벽의 영향은 무시할 수 있다. 실험에 사용한 연료는 n-Tridecane($C_{13}H_{28}$, 순도 99%)이다. 엑시플렉스 형광법에 사용하는 형광제의

산소에 의한 소광(消光) 및 연료의 착화방지를 고려해서 용기 내는 질소가스를 충진 하였다.

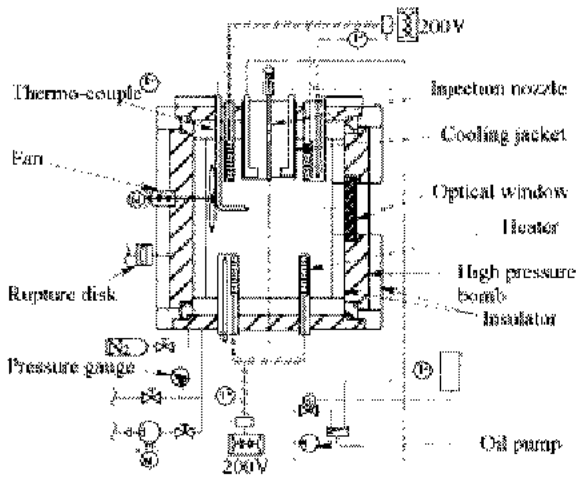


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 레이저 시트 광학 및 형광 촬영 시스템

Fig. 2는 실험에 사용한 레이저 시트 광학계 및 형광 촬영계의 개략을 보인다. 형광제의 여기광원으로 Nd:YAG 레이저(Quanta-Ray:DCR-11), 고주파 발생기(Quanta-Ray:HG-2) 및 고주파분해기(Quanta-Ray:PHS-1W)의 시스템을 통과하는 제 3고주파(파장355nm)를 이용했다. 이 레이저 광의 출력은 60mJ/pulse이고, 빔 직경은 6.4mm의 도넛(doughnut)형상의 빔, 펄스폭은 8nsec., 최대발진주파수는 10Hz이다. 용기 내에 시트 광을 입사시키기 위해, 초점거리 f40mm, f320mm, f1000mm인 3장의 실린더리칼렌즈(Cylindrical lens)를 이용했다. 레이저 광은 f40mm 및 f320의 렌즈에 의해 폭 50mm의 타원단면의 평행광으로 된 후, f1000mm의 렌즈에 의해 집광된다. 그 결과 고압용기내의 측정부에 있어서 폭 50mm, 두께 약 0.2mm의 레이저 광이 얻어진다. 렌즈는 무반사 코팅된 광학석영제이고, 자외영역에 있어서도 충분한 투과율을 가지기 때문에 레이저광의 에너지 감쇠는 거의 없다. 광학 촬영계는 레이저 시트 광에 대해서 수직으로 배치되어, 레이저 광이 통과하는 면상에 발생하는 형광의 화상을 촬영한다. 기상 및 액상 각각의 형광분광을 위해서는 다이크로익미러(Dichroic mirror, D.M.), 기상용 및 액상용의 간섭필터(Band pass filter)를 병용했다. 사용한 다이크로익미러는 청반사, 50%반사파장이 470nm이고, 기상용 간섭필터는 중심파장 389.6nm, 반치폭 18.4nm, 최대투과율 34.7%이며, 액상용 간섭필터는 중심파장 532nm, 반치폭 2nm, 최대투과율 62%의 특성을 가진다. 이러한 광학장비를 사용함으로써 레이저 광의 산란성분의 제거하고, 각각의 형광만을 얻을 수 있게 된다. 또 D.M.을 이용하는 것에 의해 동일현상의 기상과 액상의 동시분리가시화가 가능하게 된다. 강도가 미약한 형광화상을 관측하기 위하여, 대물렌즈(일본광학:Nikon f105)를 통과한 형광화상은 이미지 인텐셔 화이어(Image intensifier, I.I., Hinmatu photonics:C2100)에 의해 발광강도가 증대되어 릴레이렌즈(Relay lens, Hinmatu photonics:A3068)를 통과해 CCD 카메라(일본전기:TI-22A Ⅱ)에 결상(結像)된다. CCD 카메라의 촬영속도는 1/30msec.이고, 액상, 기상 각각의 형광수명시간이 양자 모두 1msec.이하이기 때문에, 실험현상은 동결(凍結)되어 레이저 광 입사시의 순간화상이 얻어진다.

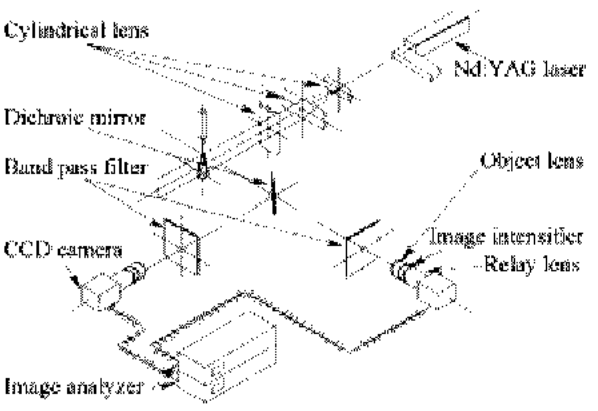


Fig. 2 Schematic diagram of laser sheet optical system and photography system

2.3 연료분사장치

Fig. 3에 전자제어 축압식 연료분사장치(일본, Denso(주), ECD-U2 system[3], 이하 **ECD-U2**로 함)를 보인다. ECD-U2는 고압 펌프, 커먼레일(Common rail), 인젝터와 이들을 제어하기 위한 ECU 및 센서들로 구성된다. 커먼레일 내의 연료압력은 고압 펌프의 연료 토출량을 전자밸브(Pump control valve : PCV)의 개폐를 가감하는 것에 의해 제어된다. 설정압력으로 유지된 커먼레일 내의 연료는 플로우 댐퍼(Flow damper)를 통하여 인젝터에 도입된다. 인젝터에는 3 방향전자밸브가 장착되어져 있고, 인젝터 내부의 니들(Needle)밸브 제어 오리피스에 의해 분사율을 제어한다. 분사노즐은 단공 홀 노즐이고, 분공경 F=0.2mm, 분공길이 l=1.0mm(세장비l/F=5.0)를 사용했다.

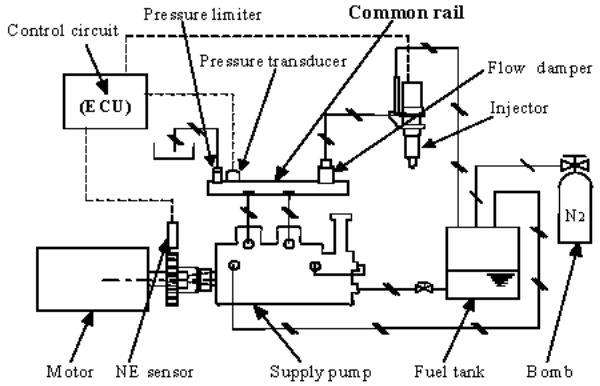


Fig. 3 Schematic diagram of ECD-U2 system

2.4 실험조건

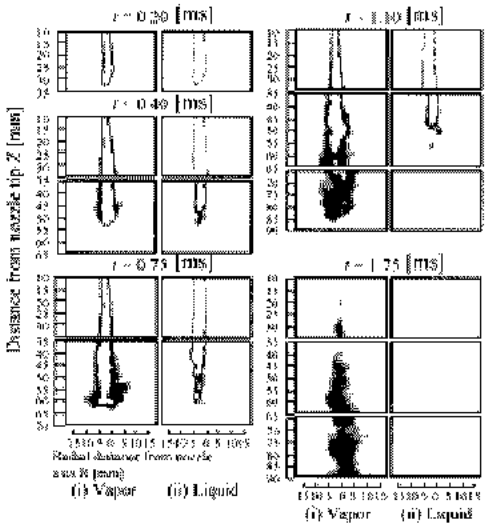
Table 1에 본 실험의 조건을 나타낸다. 용기내의 분위기조건은 실제의 소형 · 고속 직분식 디젤 기관의 분사개시초기의 실린더 내 분위기를 모사한 고온 · 고압의 분위기이다. 분위기온도 T_a=700K, 분위기압력(배압, p_a)은 주위기체의 밀도(r_a)를 5.0kg/m^3, 8.2kg/m^3, 12.3kg/m^{3}로 설정하기 위하여 1.04MPa, 1.70MPa, 2.55MPa로 각각 설정했다. 분사압력 p_{inj}=72MPa에 대해서 분사기간은 1.54ms이고, 분사연료량은 12mg이다. 그리고 본 실험에서 사용한 분사장치는 직사각형(구형)의 분사율를 가진다. 또한 분사된 연료분무의 재현성은 실험 데이터 채취 전 확인하였다.

Table 1 Experimental conditions

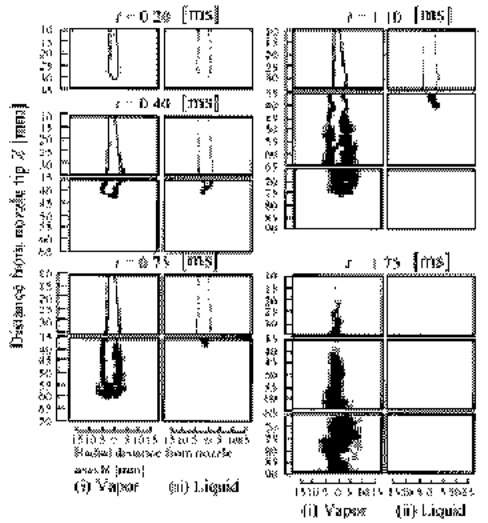
Injection nozzle	Type : Hole nozzle DLL-p		
	Diameter of hole	d_n [mm]	0.2
	Length of hole	l_n [mm]	1.0
Ambient gas			N_2 gas
Ambient temperature	T_a	[K]	700
Ambient pressure	p_a	[MPa]	1.04,1.70,2.55
Ambient density	ρ_a	[kg/m^3]	5.0,8.2,12.3
Injection pressure	P_{inj}	[MPa]	72
Injection quantity	Q_{inj}	[mg]	12.0
Injection duration	t_{inj}	[ms]	1.54

3. 실험결과 및 고찰

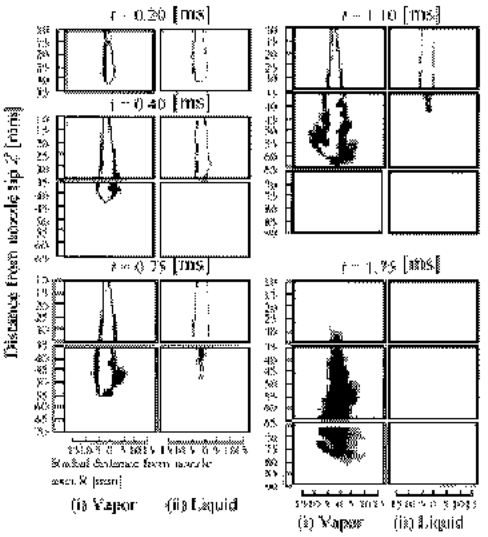
Fig. 4에 분사압력 p_{inj}=72MPa에서 주위기체밀도를 변화시킨 경우의 2차원 형광강도분포를 나타낸다. 이미지 중의 (i)와 (ii)는 증발분무의 기상과 액상을 각각 나타내고, 분무 이미지에 있어서 검정의 색깔이 짙을수록 형광강도가 높음을 나타낸다. 각 설정 밀도에 있어 분무 상류부에서차이는 거의 보



(a) r_a = 5.0 [kg/m^3], p_a = 1.04 [MPa]



(b) r_a = 8.2 [kg/m^3], p_a = 1.70 [MPa]



(c) r_a = 12.3 [kg/m^3], p_a = 2.55 [MPa]

Fig. 4 Temporal change in diesel spray with exciplex fluorescence method at p_{inj}=72MPa

이지 않는다. 그러나 시간의 경과와 함께 주위기체 밀도가 증가함에 따라 주위기체의 저항이 증가하여 분무선단거리가 짧아지고, 분무 중부 및 하류부에 있어 분무가 반경 방향으로 넓어지면서 발달하게 된다.

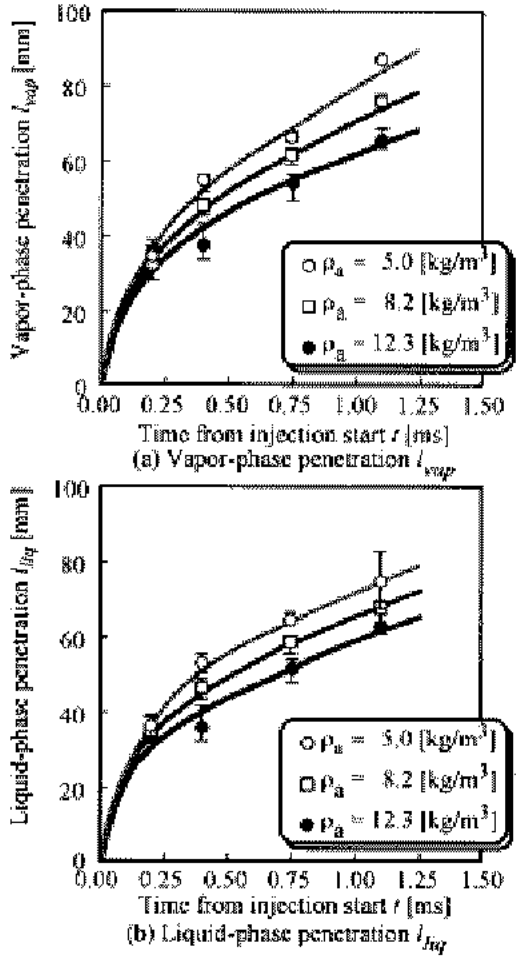


Fig. 5 Temporal change in penetration of liquid and vapor-phase at p_{inj}=72MPa

Fig. 5는 시간 경과에 따른 증발분무 기상 및 액상의 선단도달거리를 나타낸다. 각 상의 거리 값은 그림에 있어 시각으로 인지 가능한 범위까지 측정한 결과 값이다. 주위기체밀도의 증가와 함께 분무의 선단도달거리가 짧아지는 것을 확인 할 수 있다. 여기서 물체에 작용하는 항력에 대해서 생각하면 항력은 물체의 투영면적, 상대속도의 2승 및 주위기체의 밀도에 비례한다. 그러므로 주위기체 밀도가 증가함에 따라 분무에 대한 주위기체의 항력이 증가하고, 그 결과 분무선단도달거리는 짧게 된다.

$$D = C_D A \frac{\rho U^2}{2} \quad (1)$$

여기서, D는 항력, C_D는 항력계수(Drag coefficient), A는 유동방향과 수직한 평면으로의 물체의 투영면적, r는 밀도 그리고 U는 속도이다.

주위기체에 의해 저항을 받는 분무선단의 연료는 점차 운동량을 잃고, 계속해 분사되는 큰 운동량을 가진 연료에 의해 분무의 반경방향으로 밀려나가며 성장하게 된다. 그 결과 주위기체의 밀도가 높고 저항이 클수록 분무 반경방향으로 확산(폭)이 크게 된다. 또한, 상류부에서 생성된 와(渦, vortex)가 분무 하류방향으로 진행함에 따라 성장하여 분무반경방향의 확산유동을 지배한다. 그 와 유동이 분무의 성장을 지배하기 시작하는 천이점(Turning point)을 조사하기 위하여, 본 연구에서는 분무의 액상길이(Liquid length, L_{liq})를 구하였다. 이 액상길이는 액상의 형광강도가 최고치(255)의 90% 이상인 230부터 255까지의 범위에 있어 측정한 값으로 정의하였고, 그 결과를 Fig. 6에 나타낸다.

주위기체밀도가 r_a=8.2kg/m^{3}와 r_a=12.3kg/m^{3}인 경우에 있어 액상길이변화는 큰 차이가 없으나 r_a=5.0kg/m^{3}의 경우, 앞의 두 경우와 비교하면 분무 액상길이의 값이 증가한다. 이와 같이 분위기밀도의 증가에 따라 천이점이 노즐공쪽으로 이동하는 현상은 Dan[4]의 비증발분무의 연구 결과에서도 찾아볼 수 있다. 그 이유는 단순히 전단력이 증가하기 때문이 아니라, 즉 연료분류에 의해 발생한 주위기체와 연료와의 혼합기형성과정에 있어서 분무 내부에 생성된 대규모의 와속에 크고 작은 와괴(渦塊)의 증가 때문이다. 이러한 결과로부터 주위기체 밀도가 증가하면 주위기체의 유동은 촉진되고, 분무 내로의 주위기체 도입(Entrainment)이 활발해지는 것을 알 수 있다.

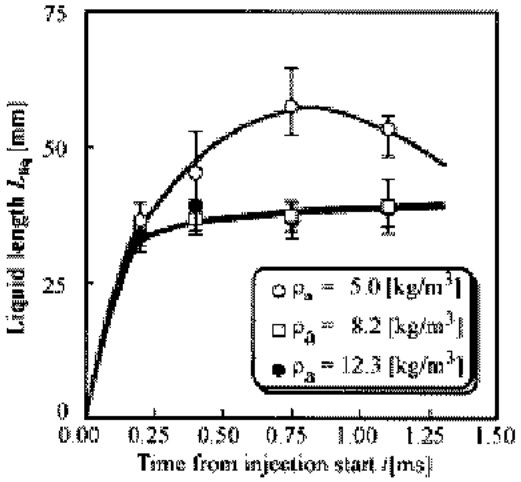


Fig. 6 Temporal change in liquid length at p_{inj}=72MPa

그리고 주위기체밀도가 큰 경우, 분무의 반경방향으로의 확산이 증가하기 때문에 대규모 와구조의 공간적인 크기는 주위기체의 밀도증가와 함께 증가한다. 또한, 그 대규모 와중에 존재하는 작은 와들은 주위기체밀도가 증가함에 따라 연료분류의 유동을 추종하는 주위기체의 질량이 증가하기 때문에 그 수가 많아진다고 생각된다. 따라서 주위기체의 밀도가 높을수록 분사연료와 주위기체의 혼합은 용이하고, 보다 균일한 혼합기형성이 기대된다.

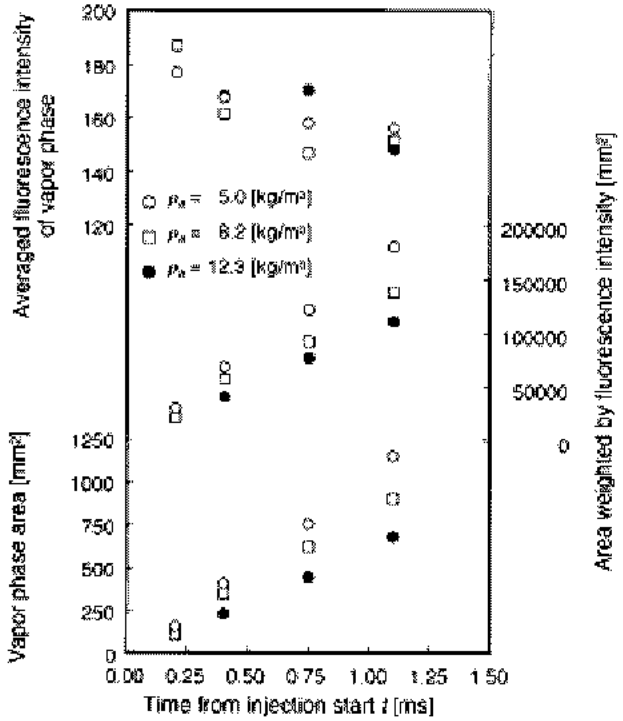


Fig. 7 Temporal change in area, weighted area and averaged fluorescence intensity of vapor phase at p_{inj}=72MPa

Fig. 7은 엑시플렉스 형광법으로 촬영한 분무의 기상면적, 분무 기상의 256단계의 형광강도에 의해서 적산한 면적 및 평균형광강도의 시간변화를 나타낸다. 그림 4에서도 볼 수 있듯이 주위기체밀도의 증가와 함께 분무반경방향으로의 기상의 확산(면적)은 증가하지만, 분무축방향의 선단도달거리가 급격히 감소하기 때문에 전체적인 증발분무 기상의 면적 및 적산면적은 감소하는 경향을 보인다. 그러나 평균형광강도에 있어서는 다소의 측정 결과의 흐트러짐은 존재하나 주위기체의 밀도가 높은 경우가 증가의 경향을 보인다. 이것은 앞의 그림 6의 결과에서 보인 바와 같이 주위기체의 밀도 증가에 따라 분무 내 주위기체 도입에 기인하는 와 유동이 활발해 지고, 그 결과 분무 내에 균일한 형광강도를 가지는 기상의 존재, 즉 균일한 혼합기의 형성을 알 수 있다.

4. 결 론

고온·고압의 증발장에서 엑시플렉스 형광법을 이용해 주위기체의 밀도변화가 증발분무의 혼합기 형성과정에 미치는 영향을 해석하였고, 연구의 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

1) 주위기체의 밀도가 높아짐에 따라 증발디젤자유분무의 액상 및 기상의 분무선단도달거리는 주위기체의 저항으로 인하여 감소하였고, 분무기상의 분무반경방향으로의 확산은 증가하였다. 이것은 분무 내부로 활발한 주위기체 도입(Entrainment)에 의한 보다 균일한 혼합기 형성을 의미한다.
2) 분사연료와 주위기체의 운동량교환에 의해 주위기체의 와 유동이 분무의 유동을 지배하기 시작하는 천이영역인 분무의 액상길이(Liquid length, L_{liq})를 조사하였고, 주위기체 밀도가 높을수록 분무액상 도달거리는 짧아져 분무공쪽으로 이동한다. 이것은 주위기체의 항력 증가와 함께 분무 내 대규모의 와 유동 형성 때문이다.

참고문헌

1. M. Nishida, T. Nakahira, M. Komori. T. Tsujimura and I. Yamaguchi, 1992, "Observation of high pressure fuel spray with laser light sheet method", SAE Paper, No.920459.
2. T. Dan, T. Yamamoto, J. Senda and H. Fujimoto, 1997, "Effect of nozzle configurations for characteristics of non-reacting diesel fuel spray", SAE Paper, No.970352.
3. ディーゼル燃燒研究會, 1997, "新ディーゼル燃料噴射", 山海堂, pp. 191-198.
4. 段 智久, 1996, "ディーゼル燃料噴霧の亂流構造とその形成機構", 同志社大學學位論文, pp. 35-40.