

3 성분 혼합연료의 분무특성 해명

명 광 재†

(2009년 3월 11일 접수, 2009년 6월 22일 수정, 2009년 6월 22일 심사완료)

Analysis of Spray Characteristic for 3-Component Mixed Fuel

Kwangjae Myong

Key Words : Instability Wave(불안정파), Vortex(와류), Near Nozzle Region(분공 부근 지역), Fuel Properties(연료 물성치), Spray Structure(분무구조)

Abstract

The instability wave formed near nozzle region grows to vortex with large scale in downstream region of spray. It plays an important role in the fuel-air mixing, combustion process and engine exhaust emissions in direct injection diesel engine. The objective of this study is to analyze effect of variant parameters (injection pressure, ambient gas density, etc.) and fuel properties on spray instability near nozzle region. Spray structure near nozzle region was investigated using a magnification photograph. A pulsed Nd-YAG laser was used as a light source, and image was taken by CCD camera. The following conclusions are drawn from this experimental analysis. In low ambient density, the effect of fuel properties on spray instability near nozzle region is dominant. In high ambient density, the effect of ambient gas on spray instability near nozzle region is dominant. High jet velocity has strong influence on spray instability.

1. 서론

디젤기관은 열효율이 높고 경제성이 우수하기 때문에 폭넓게 사용되고 있으며, 지구온난화의 원인이 되는 CO₂ 배출량이 적은 장점이 있다. 그러나 질소산화물(NO_x), 입자상물질(PM) 및 매연 등의 배출가스는 대기오염의 원인이 되기 때문에 최근에는 사회문제로 부각되고 있다. 따라서 이들 배출가스를 동시에 저감시키기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다. 그중에서도 합산소물질을 연료첨가제 또는 주연료로 사용하는 연소제어^(1~3) 예혼합압축자착화(HCCI)^(4,5)를 이용한 NO_x, PM의 동시저감 및 고효율을 실현시키기 위한 연구가 활발하다. 한편 액화 CO₂ 혼합연료^(6,7) 및 고옥탄가

연료와 고세탄가연료를 물분율로 혼합한 2 성분 혼합연료를⁽⁸⁾ 이용한 분무/연소 제어법이 주목 받고 있으나, 다성분연료에 관한 분무거동(미립화, 증발, 혼합기형성과정)의 정확한 해명은 아직 이루어지지 않고 있다. 분무거동에 관한 종래의 연구는 현상을 단순화하기 위해 단일성분하에서 행하여졌지만 실제 연료의 분무성상과는 크게 다르고 불분명한 점이 많다.

일반적으로 액체분류의 미립화는 Fig. 1에 표시한 것처럼 주위기체와 액체분류의 밀도비 (ρ_d/ρ), *Re* 수, *Oh* 수 등으로 정의된다. 이들 무차원수에서 알 수 있듯이 액체분류의 미립화거동은 사용하는 연료의 물성치에 지배된다. 즉, 다성분연료에서는 연료조성이 바뀌므로써 표면장력, 밀도 등이 바뀌게 됨으로 단일성분과는 다른 거동이 예상되며, 액체분류의 관성력, 주위기체와의 상호작용 또한 액체의 복원력 등에 좌우되어 증발 및 착화연소에 이르기까지 지대한 영향을 미칠 것이다. 따라서 본 연구에서는, 분공근방의 분무를 확대촬영하고 액적산란광

† 회원, 조선이공대학 자동차과
E-mail : kjmyong@chosun-c.ac.kr
TEL : (062)230-8335 FAX : (062)230-8331

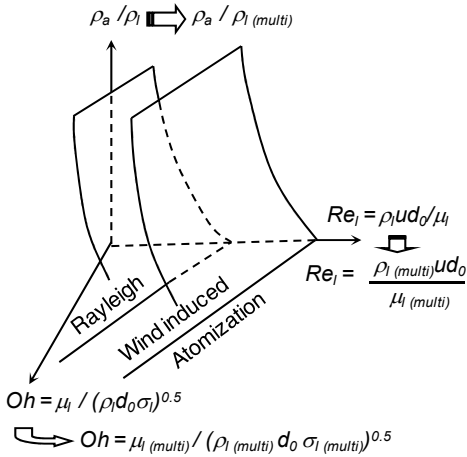


Fig. 1 Jet break-up regime by Reitz(1978)

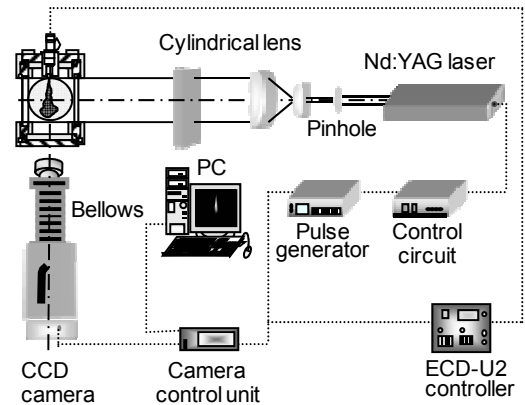


Fig. 3 Optical setup for magnification photograph

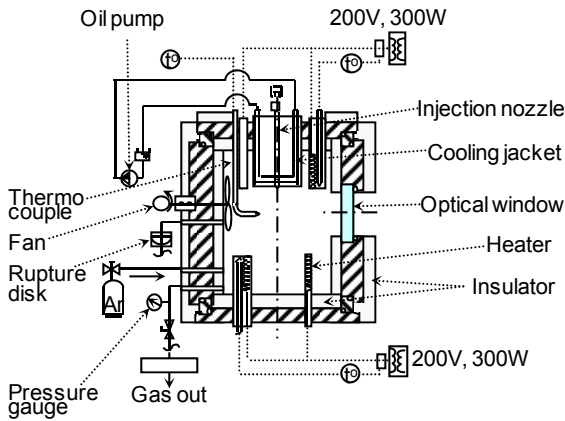


Fig. 2 Schematic cross-section of the constant volume vessel

이미지의 해석으로부터 연료조성, 분사압, 분위기 밀도 등이 분공근방 분무구조에 미치는 영향의 해명을 목적으로 한다.

2. 실험장치 및 실험조건

연료분사계는 커먼레일식 전자제어분사장치를 사용하였다. 커먼레일시스템은 연료압송펌프, 커먼레일, 인젝터, 이들을 제어하는 전자제어 시스템으로 구성된다. 분사압은 전자제어시스템으로부터 연료압송펌프의 토출량을 변화시켜 제어한다. 가압된 연료는 용기상부에 장착된 단공형 홀노즐($d_n=0.2mm$)로부터 수직방향으로 분사되며 레이저시트광을 이용하여 분무거동을 촬영한다. Fig. 2는 고온고압정용용기의 개략도를 나타낸다. 용기내의 온도, 압력은 소형직분식 디젤기관 연료분사시기에 상응하는 분위기온도 ($T_{amb}=700K$), 분위기압력($P_{amb}=2.5MPa$)으로 셋팅되어지며, 고압용기에는 레이저시트광의 입사용과 관측

용 창($f=120, t=45$)이 서로 직각으로 설치되어 있다.

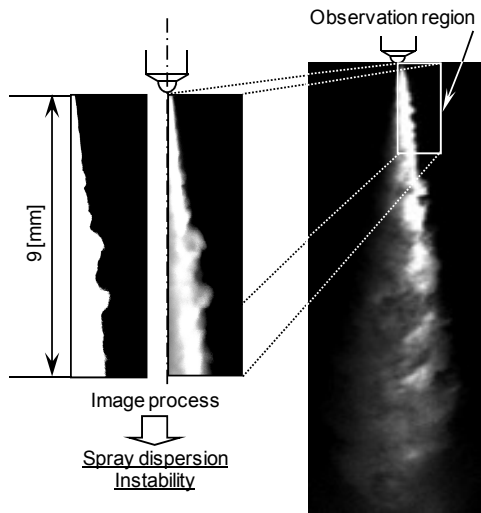
레이저시트광을 분무에 입사하여 액적군에 의한 산란광으로부터 분공근방의 분무거동은 촬영된다. 확대촬영법의 광학계를 Fig. 3에 나타낸다. 레이저광은 Nd:YAG Laser(Spectra Physis: PIV 400)의 제 2 고주파($\lambda=532nm$)의 레이저빔을 이용했다. 레이저광의 펄스폭은 8nsec, 최대발진주파수는 10Hz 이다. 레이저광은 핀홀을 통과한 후 직경 10mm의 원형빔이 되고, 초점 $f=40mm, f=320mm$ 의 cylindrical lens에 의해 폭은 약 50mm의 평행광으로 변형되고, $f=1000mm$ 의 Cylindrical lens에 의해 두께 약 0.2mm의 시트광으로 변형되어 분무중심축으로 입사된다. 분무액적 산란광은 CCD 카메라(Hamamatsu Photonics: C4742-95)로 촬영된다. 본 연구에서 사용한 카메라는 유효화소수 1280pixels×1024pixels, 화소사이즈 6.7mm×6.7mm, 수광면 사이즈 8.58mm×6.86mm(2/3inch size)이다.

분공근방의 분무구조를 관찰하기 위한 촬영시야 범위를 Fig. 4에 표시한다. 촬영범위는 9mm×8.5mm, 해상분해능은 109pixels/mm이며, 촬영배율은 등배율이다. 취득한 액적산란광 이미지(256 gray levels)를 흑백화상으로 변환한 후(Fig. 4 참조), 분공근방 분무의 불안정 및 확산과정을 조사하였다.

본 연구에서 사용한 연료는 i-octane, n-dodecane, n-hexadecane 등 파라핀계를 단일성분으로 사용하였고, 이들을 질량분율 6:3:1, 1:1:1, 1:3:6으로 혼합한 연료를 다성분연료로 사용하였으며, 편의상 이들을 연료 A(6:3:1), 연료 B(1:1:1), 연료 C(1:3:6)로 칭한다. 분무의 불안정성을 해명하기 위해 분사압, 주위기체의 밀도(점성)를 파라미터로 선정하여 그 영향을 파악하였다. 분사압은 저압분사(42MPa)와 고압분사(112MPa) 두 조건으로 하였다. 이조건은 Fig. 1의 분무영역(atomization)에 해당한다. 분위기밀도 또한 저

Table 1 Experimental conditions

Test Fuel	Single component fuel (C ₈ H ₁₈ , C ₁₂ H ₂₆ , C ₁₆ H ₃₄)
	Multi-component fuel (Fuel <i>A</i> , Fuel <i>B</i> , Fuel <i>C</i>)
Amb. Temp. T_{amb} [K]	300
Amb. Density ρ_{amb} [kg/m ³]	5, 30
Amb. Gas	Ar
Inj. Pressure P_{inj} [MPa]	42, 112
Inj. Quantity Q [mg]	12

**Fig. 4** Observation region of near nozzle region

밀도(5kg/m³)와 고밀도(30kg/m³) 두 조건으로 하였으며, 고밀도(30kg/m³) 분위기장 형성과 자착화 방지를 위해 공기(질소) 대신 가스상수(R)가 작은 Ar 가스를 주위기체로 선정하였다.

분사량은 12mg 으로써 모든 연료 및 실험조건에 대해서 일정하다. 실험조건을 Table 1, 단일성분/다 성분연료의 물성치 및 질량분율 등을 Table 2 부터 Table 4 에 표시한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연료조성이 분공근방 분무구조에 미치는 영향

Fig. 5 는 분사압 $P_{inj}=112\text{MPa}$, 분위기밀도 $\rho_{amb}=30\text{kg/m}^3$ 의 조건에서 연료 *A*, *B*, *C* 의 무차원시간 $t/t_{inj}=0.1, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0$ 의 분공근방 분무액적군 산란광 이미지를 흑백화 한 것 이다. 그림에서 알 수 있듯이 모든 연료에 대해서 분공으로부터 2mm 이내에서 미세파가 발생함을 확인할 수 있다. 이들

Table 2 Fuel properties of single component fuels

Single component fuel	C ₈ H ₁₈	C ₁₂ H ₂₆	C ₁₆ H ₃₄
Boiling point T_b [K]	372	489	560
Density (293K) ρ_l [kg/m ³]	692	759	795
Viscosity (293K) μ_l [mPa·s]	508	1,542	3,394
Specific heat (293K) C_{liq} [kJ/kg/K]	2.032	2.045	1.981
Latent heat of vaporization (at 298K) h_{vap} [kJ/kg]	305.4	360.0	358.3
Latent heat of vaporization (at B.P) h_{vap} [kJ/kg]	272	256.6	227.4
Critical pressure P_{cr} [MPa]	2.58	1.704	1.42
Critical temperature T_{cr} [K]	544	658	725
Surface tension (293K) σ [mN/m]	20.61	27.09	31.04
Diffusivity (293K) D [cm ² /s]	0.068	0.055	0.047
Molecular weight	114	170	226

Table 3 Mass fraction of multi-component fuels

Fuel component	Mass Fraction of MCFs
i-octane:n-dodecane:n-hexadecane (C ₈ H ₁₈ : C ₁₂ H ₂₆ : C ₁₆ H ₃₄)	Fuel <i>A</i> (=6 : 3 : 1)
	Fuel <i>B</i> (=1 : 1 : 1)
	Fuel <i>C</i> (=1 : 3 : 6)

Table 4 Fuel properties for multi-component fuels

Multi-component fuel	Fuel <i>A</i>	Fuel <i>B</i>	Fuel <i>C</i>
Density (293K) ρ_l [kg/m ³]	722	748	773
Viscosity (293K) μ_l [μPa·s]	825	1,265	2,061
Specific heat (293K) C_{liq} [kJ/kg/K]	2.036	2.027	2.010
Critical pressure P_{cr} [MPa]	2.72	2.43	1.85
Critical temperature T_{cr} [K]	604	654	690
Surface tension (293K) σ [mN/m]	23.38	25.99	28.57

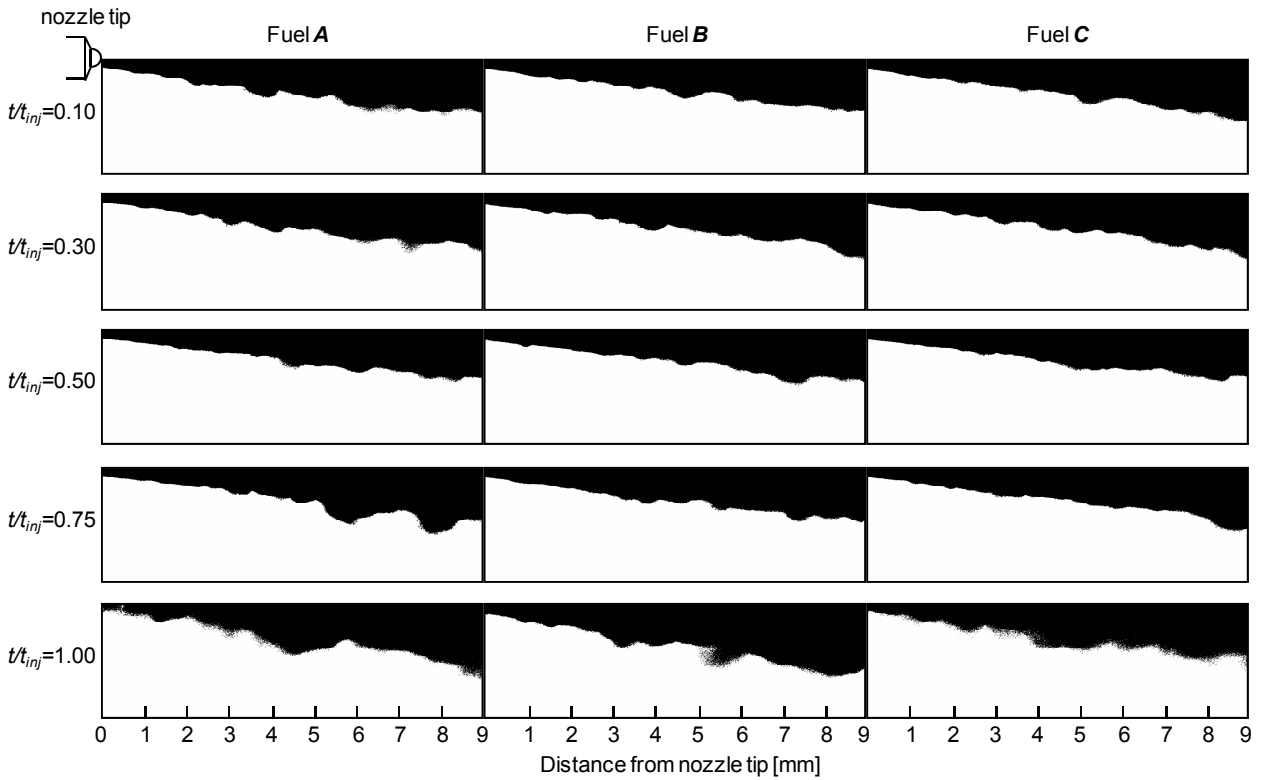


Fig. 5 Spray images in near nozzle region ($P_{inj}=112\text{MPa}$, $\rho_{amb}=30\text{kg/m}^3$)

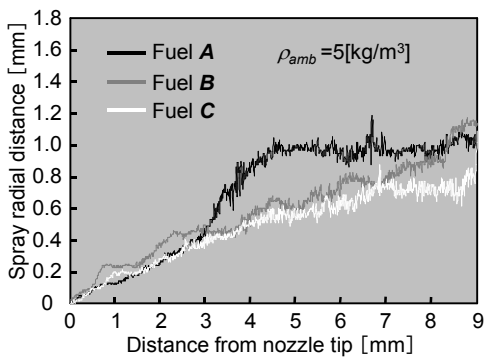


Fig. 6 Change in spray radial distance ($P_{inj}=42\text{MPa}$, $t/t_{inj}=0.1$)

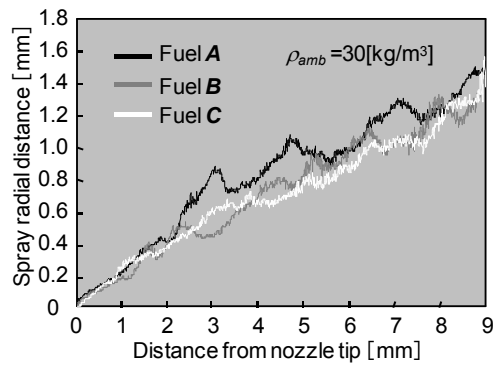


Fig. 8 Change in spray radial distance ($P_{inj}=42\text{MPa}$, $t/t_{inj}=0.1$)

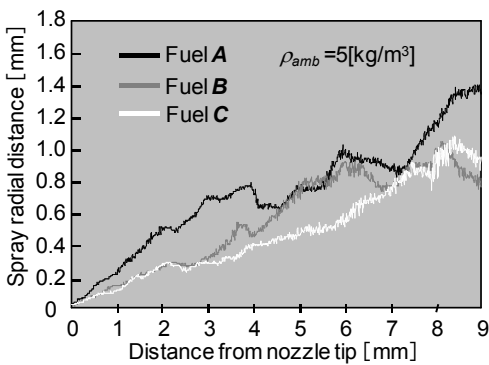


Fig. 7 Change in spray radial distance ($P_{inj}=112\text{MPa}$, $t/t_{inj}=0.1$)

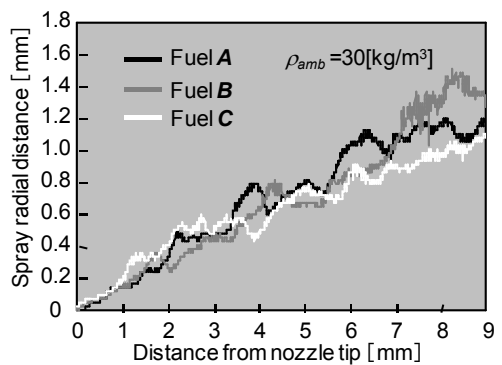


Fig. 9 Change in spray radial distance ($P_{inj}=112\text{MPa}$, $t/t_{inj}=0.1$)

미세파는 시간의 경과와 함께 성장하여 하류부에서 스케일이 커짐을 알 수 있다. 이와같은 현상은 연료 B, C 보다 연료 A 에서 확실히 관찰된다. 그 이유는 연료물성 즉, 액체의 복원력으로 설명이 가능하다. 액체의 복원력(표면장력, 점성)은 분류의 안정성을 유도하여 불안정성을 감소시키는 작용을 하는 것으로 생각된다. 고비점성분과 중비점성분을 각각 60%, 30% 함유하고 있는 연료 C 는 연료 A 에 비해서 표면장력과 점성이 각각 1.2 배, 2.5 배 크기 때문에 저비점성을 다량으로 함유하고 있는 연료 A 보다 안정화되고 이로인해 반경방향으로의 확산이 작아진다.

Fig. 5 의 이미지로부터 반경방향의 길이를 측정하여 분사압과 분위기밀도가 분공근방 분무구조에 미치는 영향을 조사하였다. Fig. 6~Fig. 9 에 분사압 (42MPa, 112MPa)과 분위기밀도(5kg/m³, 30kg/m³)에 대한 반경거리의 결과를 나타낸다. 무차원시간 $t/t_{inj}=0.1$, 분사압 $P_{inj}=42MPa$, 분위기밀도 $\rho_{amb}=5kg/m^3$ 의 조건(Fig. 6 의)하에서, 저비점성분을 다량 함유한 연료 A 가 고비점성분을 다량 함유한 연료 B, C 보다 반경방향으로의 확산이 크고, 각 분무(연료 A, B, C)의 표면이 매끄러운 것을 확인할 수 있다. 반면, 고압분사(Fig. 7)에서는 저압분사보다 연료조성에 의한 반경방향 확산이 크다는 것을 확인할 수 있다. 분사속도(분사압)의 증가는 액류 불안정의 생성과 성장에 기여하기 때문에 분무표면의 불안정 또한 저압분사(Fig. 6)보다 커짐을 알 수 있다. 이들 불안정의 특징을 살펴보면, 대체적으로 와(渦)의 스케일은 크지만 주파수는 매우 작으며, 연료 C 보다는 연료 A 가 와(渦)의 스케일과 주파수가 크다. Fig. 8 은 분사압 $P_{inj}=42MPa$, 분위기밀도 $\rho_{amb}=30kg/m^3$ 의 결과를 나타낸다. 고분위기 밀도장에서 분무표면의 불안정은 저분위기 밀도장(Fig. 6, Fig. 7)과 비교하여 주파수가 증가하고 특히, 연료 A 에서는 와(渦)가 규칙적으로 배열하고 있음이 확인된다. 분무확산은 저분위기밀도장(Fig. 6, Fig. 7)보다 연료간의 차가 작지만 저비점성분을 다량 함유한 연료 A 의 확산이 제일 크다. Fig. 9 는 분사압 $P_{inj}=112MPa$, 분위기밀도 $\rho_{amb}=30kg/m^3$ 의 결과를 나타낸다. 연료 C 의 분무표면 불안정은 Fig. 7 과 비교하여 증가됨으로써 연료간의 반경방향 확산의 차는 거의 동일한 수준이다. 이것은 분위기밀도의 상승으로 증가된 분위기체의 전단력이 고점성연료의 복원력을 극복하는데 크게 작용되었다고 생각된다.

3.2 분공근방 분무의 불안정성

본 절에서는 앞 절에서 설명한 분무 불안정과 연료물성, 분사조건과의 관계를 정량적으로 해석

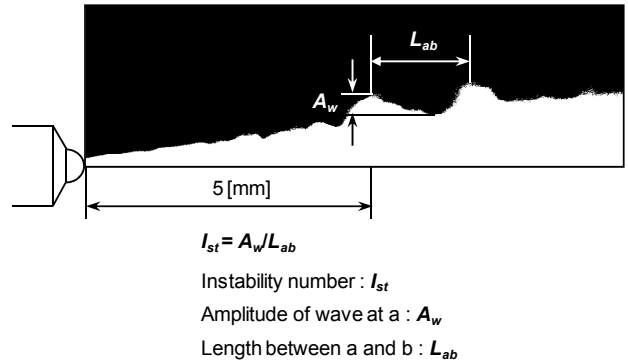


Fig. 10 Definitions of instability number

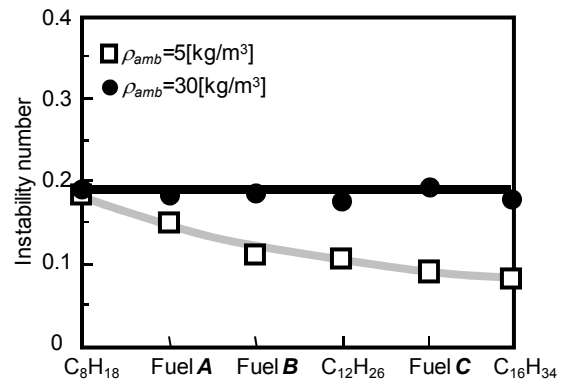


Fig. 11 Change in spray radial distance ($P_{inj}=42MPa, t/t_{inj}=0.1$)

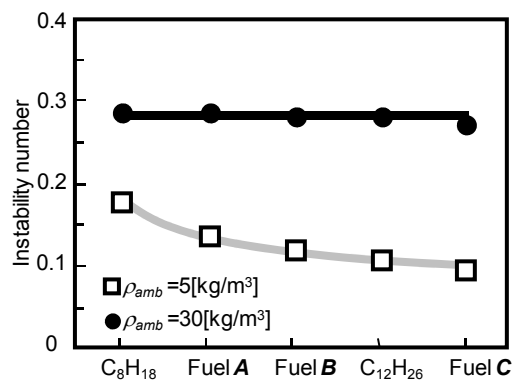


Fig. 12 Change in spray radial distance ($P_{inj}=112MPa, t/t_{inj}=0.1$)

하고 분공근방 분무구조의 거동을 고찰하기 위해서 무차원수를 도입하였다. Fig. 10 에서 알 수 있듯이 무차원수 (I_{st})는 불안정파의 진폭(A_w)과 파간의 거리로(L_{ab}) 정의하였다. I_{st} 증가하는 정의 ($I_{st}=A_w/L_{ab}$)에서 알 수 있듯이 와(渦)의 스케일과 주파수가 증가, 감소는 와(渦)의 스케일과 주파수 감소를 의미한다.

- Effect of fuel properties ≫ Effect of ambient gas
- Spray dispersion :
Low B.P MCF ≫ High B.P MCF
- Spray Instability :
Low B.P MCF > High B.P MCF

- Effect of ambient gas ≫ Effect of fuel properties
- Spray dispersion :
Low B.P MCF > High B.P MCF
- Spray Instability :
Low B.P MCF ≈ High B.P MCF

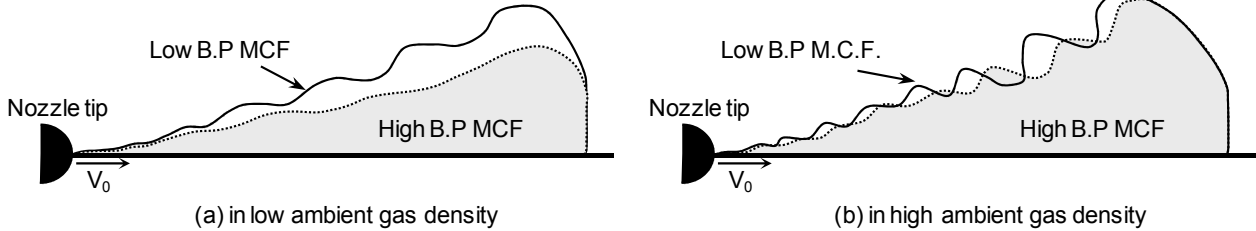


Fig. 13 Schematic of spray dispersion and instability near-nozzle region on multi-component fuels

Kosaka⁽⁹⁾ 등은 Strouhal 수(St) 해석으로 분류의 불안정성이 비정상증발분무의 연료증기 농도분포의 불균일성에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 본 연구에서 측정된 분공부근의 미세파는 노즐로부터 하류방향 약 2~3mm 에서 확인되지만 이들의 진폭이 매우작아 측정이 곤란하기 때문에 미세파가 어느정도 성장했다고 생각되는 지점(분공에서 5mm)에서 파의 진폭과 파간의 거리를 측정하고 이들의 비로써 I_{st} 를 정의하였다. 이 무차원수는 St 수를 간략화한 것으로 St 수와 다르기 때문에 불안정수(Instability Number: I_{st})로 명하였다.

Fig. 11 과 Fig. 12 에 I_{st} 결과를 나타낸다. Fig. 11 은 분사압 $P_{inj}=42\text{MPa}$, 무차원시간 $t/t_{inj}=0.1$ 에서 분위기밀도 $\rho_{amb}=5, 30\text{kg/m}^3$ 의 결과이며, Fig. 12 는 분사압 $P_{inj}=112\text{MPa}$ 에서의 단일성분과 다성분연료의 I_{st} 결과이다. 저분위기밀도장($\rho_{amb}=5 \text{ kg/m}^3$)에서 저압, 고압분사 모두 저비점성분(C_8H_{18})측에 가까워질수록 I_{st} 는 증가함으로써 연료성분과 조성차이에 대한 차가 확인되지만, 분사압 상승에 따른 차는 미미하다. I_{st} 증가는 와(渦)의 스케일과 주파수가 증가함을 의미하기 때문에 저분위기밀도장에서, 저비점성분은 고비점성분에 비해서 액체밀도가 작고 확산계수가 크기 때문에 와(渦)의 영향을 받기 쉽다. 따라서 미립화의 촉진과 난류혼합확산이 개선된다고 사료된다. 이와달리 고분위기밀도장($\rho_{amb}=30\text{kg/m}^3$)에서는, 분사압의 상승과 함께 I_{st} 는 증가하지만 연료조성에 따른 차이는 소멸된다. 이 결과로부터 고분위기밀도장에서의 분공근방 분무의 불안정성에 미치는 영향은 연료물성보다는 주위기체밀도(점성)의 상승에 따른 전단력 상승의 영향이 지배적이라고 생각된다.

4. 결 론

본 연구는 분공근방 분무의 불안정성과 확산에 대한 연료조성, 분위기밀도, 분사압력 등이 미치는 영향의 해명을 목적으로 하였다. Fig. 13 은 분공근방 분무구조에 관한 가설적인 개략도를 나타낸다. 저분위기 밀도장에서는 주위 기체의 영향(전단작용)이 작기 때문에 분공 근방 분무구조에 미치는 영향은 연료물성이 지배적이며, 그 결과 저비점 다성분 연료는 고비점 다성분 연료보다 분무 반경방향으로의 확산이 크고 분무표면은 불안정한 구조를 갖는다. 이와 달리 고분위기 밀도장에서는 주위기체의 전단작용이 크기 때문에 연료조성의 영향보다는 주위기체의 영향이 지배적이다. 이 때문에 저/고비점 다성분 연료의 분무확산의 차는 작아지며, 분무의 불안정성에 대해서는 유사한 경향을 갖는다. 분공근방 분무의 불안정성을 지배하는 가장 큰 요소는 분류속도이기 때문에 분위기조건에 관계없이 고압분사는 분무 불안정성을 지배하는 인자이다.

후 기

본 논문은 2008 년 조선이공대학 학술연구비 지원으로 수행되었다.

참고문헌

(1) Kajitani, S., et al., 1998, "Engine Performance and Exhaust Characteristics of Direct Diesel Engine with DME," *SAE Paper* 982676.

- (2) Takaaki Kitamura, et al., 2002, "Detailed Soot Kinetic Modeling of Smokeless Diesel Combustion with Oxygenated Fuels," *Int. J. Engine Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 223~248.
- (3) Takaaki Kitamura, et al., 2003, "Soot Kinetic Modeling and Empirical Validation on Smokeless Diesel Combustion with Oxygenated Fuels," *SAE Paper*, No. 2003-01-1789.
- (4) Yasuo Asaumi et al., 2001, "Analysis of Heat Rejection and Combustion Characteristics in Premixed Lean Diesel Combustion (PREDIC)," *Proceedings of 2001 JSAE Annual Congress*, No. 51-01, Paper No. 20015191, pp.13~16.
- (5) Sanghoon Kook, et al., 2004, "Homogeneous Charge Compression Ignition Engine Two-Stage Diesel Fuel Injection," *THIESEL 2004 Thermo- and Fluid Dynamic Process in Diesel Engines*, pp. 497~509.
- (6) Fujimoto, H., et al., 1995, "New Concept on Lower Exhaust Emission of Diesel Engine," *SAE Paper*, No. 952062.
- (7) Jiro Senda et al., 1999, "Soot and NOx Simultaneous Reduction by Use of CO₂ Mixed Fuel," *Trans. of the JSAE*, Vol. 30, No. 1, pp. 15~20.
- (8) Yoshitaka Ono, Toshio Shudo, 2001, "Research on HCCI Combustion of Dimethyl Ether and Methanol-Reformed Gas," *Proceedings of 2001 JSAE Annual Congress*, No. 51-01, Paper No. 20015074, pp. 1~6.
- (9) Hidenori Kosaka et al., 1999, "A Study on the Structure of Transient Sprays (2nd Report, 2-D Visualization of Fuel Vapor Concentration, Velocity and Ignition Region)," *Trans. of the JSME (B)*, Vol. 65, No. 640, pp. 4132~4137.