

확대촬영법 및 Mie 산란광법을 이용한 다성분연료의 분무구조에 관한 실험적 해명

명광재* · 윤준규†

(원고접수일 : 2008년 3월 31일, 원고수정일 : 2008년 6월 17일, 심사완료일 : 2008년 7월 1일)

An Experimental Analysis on the Spray Structure of Multi-component Fuels Using Magnification Photograph and Mie Scattering Images

Kwang-Jae Myong* · Jun-Kyu Yoon†

Abstract : The objective of this study was to analyze the effect of mixed fuel composition and mass fraction on spray inner structure in evaporating transient spray under the variant ambient conditions. Spray structure and spatial distribution of liquid phase concentration were investigated using a thin laser sheet illumination technique on the three component mixed fuels. A pulsed Nd:YAG laser was used as a light source. The experiments were conducted in a constant volume vessel with optical access. Fuel was injected into the vessel with electronically controlled common rail injector. Used fuel contains i-octane(C_8H_{18}), n-dodecane($C_{12}H_{26}$) and n-hexadecane($C_{16}H_{34}$) that were selected as low-, middle- and high-boiling point fuel, respectively. Experimental conditions are 42 MPa, 72 MPa and 112 MPa in injection pressure, 5 kg/m^3 , 15 kg/m^3 and 30 kg/m^3 in ambient gas density, 300 K, 500 K, 600 K and 700 K in ambient gas temperature, 300 K and 368 K in fuel temperature and different fuel mass fraction. Experimental results indicated that the multi-component fuels made two phase region mixed vapor and liquid so that it would be helpful to improve combustion, for the fuels of high boiling point component could accelerate evaporation very much according as low boiling point fuel was added to high boiling point fuel.

Key words : Multi-component fuels(다성분연료), Constant volume vessel(정적용기), Magnification photograph(확대촬영법), Mie scattering images(Mie 산란광법), Diesel spray(디젤분무)

1. 서 론

최근 자동차로부터 배출되는 유해가스로 인하여

대기환경의 오염문제가 전 세계적으로 심각한 우려가 되고 있다. 이에 따른 환경정책 및 소비자의 요구로 저공해, 고효율 및 고출력을 위한 자동차용

† 교신저자(경원대학교 기계·자동차공학과, E-mail: jkymoon@kyungwon.ac.kr, Tel: 031)750-5651)

* 조선이공대학 자동차과

디젤기관개발에 대한 차세대 대책연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 디젤기관에서 발생하는 연료분무의 운동, 혼합기형성 및 증발, 자발화, 예혼합화염 및 확산화염 등은 매우 복잡하므로 실험계측으로 비정상현상을 정확히 설명하기에는 어려움이 많다. 종래의 분무연소에 관한 연구에서는 분무연소현상을 간단히 하기 위해서 단성분연료를 사용해 왔다. 그러나 경유 또는 가솔린 등의 연료는 수십종 이상의 성분으로 된 다성분연료임으로, 함유되어 있는 성분이 서로 물성이 달라 증발되는 현상이 다르므로 단성분연료만으로 해석한다는 것은 충분하지 않다. 다성분연료는 상변화과정에서 2상 변화영역을 형성하므로 단성분연료의 증발과정과 확실히 다르다.

이에 따른 연구동향으로 Akihama 등⁽¹⁾은 혼합연료의 각 성분의 증발특성을 서로 다른 성분의 비점뿐만 아니라 혼합연료 자체의 증류특성에 의존한다는 관점으로부터 형광계를 함유시켜 혼합연료의 증류특성을 관찰하였고, Krämer 등⁽²⁾은 레이저유도형광법을 이용한 다성분연료의 분무특성을 촬영한 결과로 저비점성분은 연소실내에 균일한 분포를, 중비점성분은 실린더내의 유동에 따라 불균일한 분포를 나타남을 해석하였으며, 그 밖에 다성분 혼합연료의 증발 및 착화연소해석^{(3)~(7)}을 통하여 연료증기의 공간분포를 재현하여 정성적인 연구의 가능성을 제시하였다.

본 연구에서는 연료물성이 서로 다른 i-옥탄, n-도데칸, n-헥사데칸의 3성분연료를 적절히 혼합한 연료조성에 따라 정적용기의 분위기 온도와 밀도, 연료온도 및 분사압력 등을 변화시켜 Nd:YAG 레이저를 이용한 분무의 확대 및 액적산란광을 촬영하여, 이들 인자가 디젤분무장에서 분무구조에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 다성분연료의 증발특성

Fig.1은 본 실험에서 사용한 다성분연료의 압력-온도선도를 NIST Mixture Property Data base 프로그램⁽⁸⁾을 이용하여 산출한 결과를 나타내고 있다.

이는 3성분연료인 i-옥탄, n-도데칸, n-헥사데칸의 혼합연료의 질량분율을 6:3:1, 1:1:1, 1:3:6으로 혼합하여 각 압력 및 온도에서 Fugacity(散逸性)를 산출하여 기액평형을 추산하였다. 이와 같이 저비점측의 포화증기압곡선은 고비점측으로, 고비점측의 포화증기압곡선은 저비점측으로 이동하여 2상영역을 형성하는 특성을 보인다. 이 2상영역중에 있어서 기상, 액상의 2상은 각 온도, 압력상태에 대응한 비율로 혼합되어 있다. 본 실험연료는 실제연료에 가깝도록 저·중·고비점의 3성분연료인 i-옥탄, n-도데칸 및 n-헥사데칸을 질량분율을 6:3:1, 1:1:1, 1:3:6으로 혼합한 다성분 혼합연료를 사용하여 편의상, 연료 a, 연료 b, 연료 c로 정하였다. Table 1은 사용한 연료의 물성치를 나타내었다.

3. 실험장치 및 방법

다성분연료의 분무근원부근의 난류 및 증발장에서 분무구조를 설명하기 위해서 정적용기를 이용하여 광학적 계측을 하였다. Fig. 2는 실험에 사용되는 고압·고온용기인 정적용기의 개략도를 나타내었고, 용기의 재질은 SS400이고, 설정압력은 3.4 MPa으로 최대사용압력을 3.0 MPa으로 하였다. 고압용기에는 레이저시이트광 입사용 및 관측용의 유리창(직경 120 mm, 두께 45 mm)를 직교하도록 취부하고 있다. 유리창은 자외광의 통과성 및 내열성을 고려하여 합성석영유리를 사용하여 입사

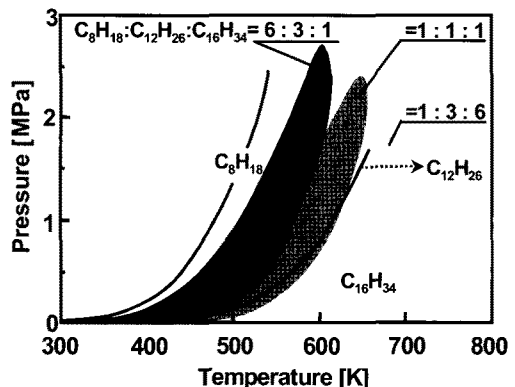


Fig. 1 P-T diagram of multi-component fuels

Table 1 Fuel Properties for single and multi-component fuels

Properties \ Fuel	C_8H_{18}	$C_{12}H_{26}$	$C_{16}H_{34}$
Boiling point, [K]	372	489	560
Density(293K), [kg/m ³]	692	759	795
Viscosity (293 K), [μPa·s]	508	1,543	3,399
Latent heat of vapor (298K), [kJ/kg]	305.4	360.0	358.3
Latent heat of vapor (at B.P.), [kJ/kg]	272.0	256.6	227.4
Properties \ Fuel	Fuel(a)	Fuel(b)	Fuel(c)
Density(293K), [kg/m ³]	722	748	773
Viscosity(293K), [μPa·s]	825	1,265	2,061
Critical press., [MPa]	2.72	2.43	1.85
Critical temp., [K]	604	654	690
Surface tension, [mN/m]	23.38	25.99	28.57

레이저광의 감쇠를 막기 위해 무반사 코팅을 하였다.

Fig. 3은 분무근원부에서 액적산란광화상의 해석을 위한 확대촬영법을 이용한 광학시스템의 개략도를 나타내었고, 연료시스템은 일본 Denso제 커먼레일시스템(ECD-U2, φ0.2의 단공노즐)을 사용하였고, Table 2는 실험조건을 나타내었다.

레이저광원은 Nd:YAG레이저(Spectra Physics : PIV 400)의 제 2고주파(λ=532 nm)의 빔을 사용하여 레이저광의 펄스폭은 8 ns, 최대발진주파수는 10 Hz로 하였다. 원형빔은 핀 홀을 통과하여 φ=10 mm의 빔으로 축소시켜 시트광을 만들기 위해 초점거리 f=40, 320 mm, 1000 mm의 3장의 Cylindrical lens를 이용하였다. 이 때 레이저광은 f=40 mm 및 f=320 mm의 렌즈로 폭 50 mm의 타원단면의 평형광을 만든 후, f=1000 mm의 렌즈에 의해 두께방향으로 집광되어 시트광의 중심부가 촬영영역을 통과하도록 입사시킨다. 분무액적으로부터 산란광은 CCD카메라(Hamamatsu Photonics: C4742-95)로 촬영하여 흑백의 2색 화상으로 변환하였다.

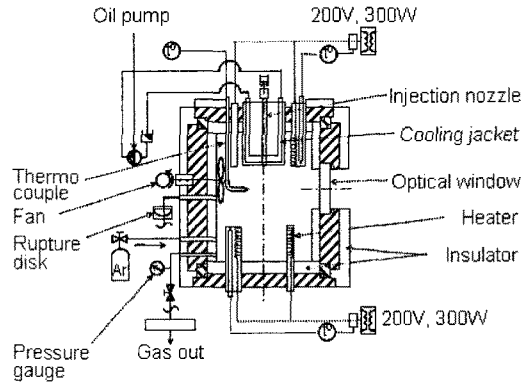


Fig. 2 Schematic cross section of constant volume vessel

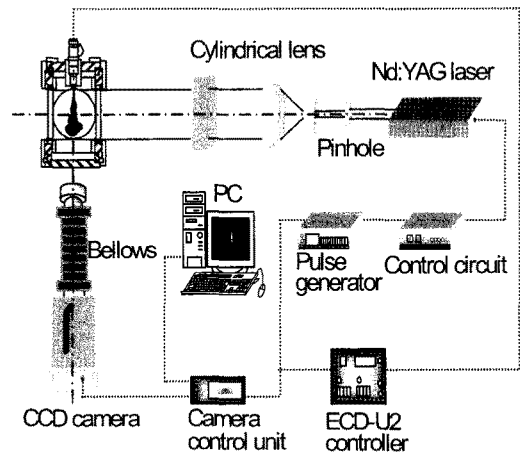


Fig. 3 Schematic setup of magnification photograph

Table 2 Experimental conditions

Conditions \ Fuel	Single and multi-component fuels
Ambient temp., T_{amb} [K]	300
Ambient density, ρ_{amb} [kg/m ³]	5.30
Injection press., P_{inj} [MPa]	42, 112
Ambient gas	Ar
Injection Quantity, Q [mg]	12

Fig. 4는 분무근원부근의 분무구조를 관찰하기 위해 촬영시야범위를 나타내었고, 이 때 증발분무의 내부구조를 관찰하기 위해서 Mie산란광 화상촬영법을 이용하였다. Fig. 5와 Table 3은 Mie산란광 화상촬영을 위한 광학시스템의 개략도 및 실험

조건을 나타내었다. 이 때 레이저 파워는 5 mJ/pulse로 하였다.

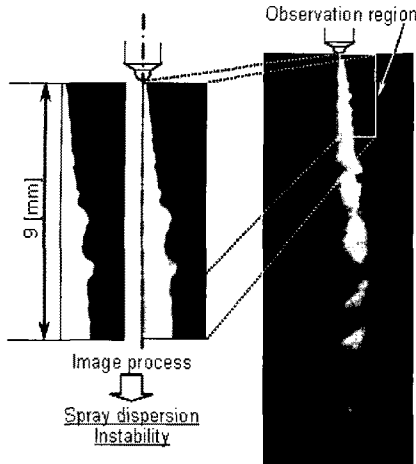


Fig. 4 Observation region near nozzle

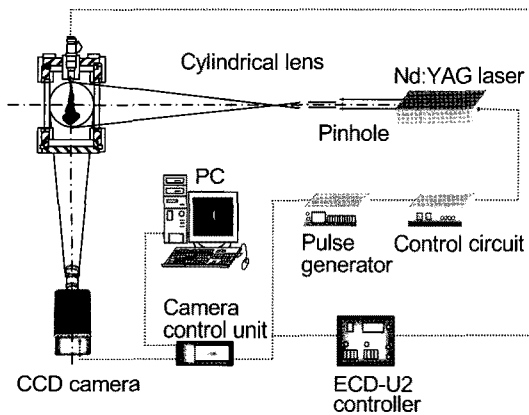


Fig. 5 Schematic setup of laser sheet light system

Table 3 Experimental conditions

Conditions	Fuel	Single and multi-component fuels
Ambient temperature, T_{amb} [K]		500, 600, 700
Fuel temperature, T_{fuel} [K]		300, 368
Ambient density, ρ_{amb} [kg/m ³]		5, 15
Injection pressure, P_{inj} [MPa]		72
Ambient gas		Ar
Injection quantity, Q [mg]		12

4. 실험결과 및 고찰

4.1 분무근원부의 내부구조

액체분류의 분열 또는 미립화는 액류의 관통력, 주위기체와 상호작용과 함께 액체가 갖는 복원력 등에 크게 좌우되고, 증발 및 착화연소에 이르기까지 지대한 영향을 미친다. 특히, 다성분연료에서는 조성에 따라 표면장력, 밀도 등이 변하게 되어 다른 거동을 나타낸다. 여기서는 확대촬영에 의해 얻어진 분무근원부에서 액적산란광화상의 해석을 통하여 분무근원부의 구조에 미치는 연료조성, 분사압력, 분위기밀도의 영향을 고찰하였다.

4.1.1 연료조성의 영향

Fig. 6은 연료 a, b, c에 대하여 분사압력 112 MPa, 분위기밀도 30 kg/m³의 조건에서 무차원 시간 $t/t_{inj}=0.1, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0$ 에 따른 분무근원부의 액적군에 의한 산란광화상을 2색화한 결과를 나타내었다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이 어떤 연료에도 분공으로부터 2 mm내에 Kelvin-Helmholtz의 불안정성에 기인한 세파(細波)가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또 그 파는 시간의 경과에 따라 성장하여 분무하류에서 그 scale(크기)은 커진다. 이와 같은 현상은 연료 b, c보다 연료 a에서 명확히 나타난다. 이것은 연료물성 중에서 액체의 표면장력 및 점성에 따라 설명이 가능하다. 따라서 액체의 복원력(표면장력, 점성)은 연료분류를 안정한 상태로 유도하기 때문에 액체로 인해 난류작용이 감소됨을 알 수 있다.

즉, Table 1에서 나타난 물성치와 같이 고비점 성분과 중비점성분을 각각 60 %, 30 %를 포함하고 있는 연료 c는 연료 a에 비해 표면장력에서 1.2배, 점성에서는 2.5배 크기 때문에 저비점성분을 많이 포함하고 있는 연료 a에 비해 분무는 안정함으로 반경방향으로 퍼짐성은 적다. 결국 저비점 연료성분이 많을수록 분무경계면에서 와류가 발생하기 쉽고, 와의 성장에 의한 분무근원부의 미립화가 더 촉진됨을 알 수 있었다.

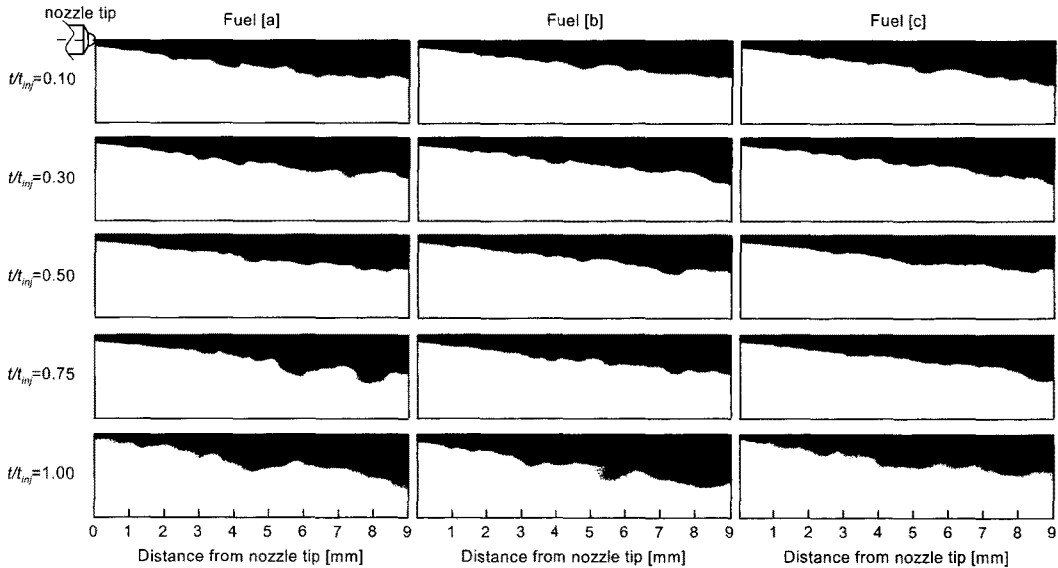


Fig. 6 Spray image near nozzle region (at $P_{inj} = 112 \text{ MPa}$, $\rho_{amb} = 30 \text{ kg/m}^3$)

4.1.2 분사압력 및 분위기밀도의 영향

Fig. 6과 같은 2색화한 화상으로부터 분무반경 방향의 계측이 가능하여 분사압력 또는 분위기밀도 등이 분무근원부의 구조에 미치는 영향을 고찰할 수 있다.

Fig. 7~10은 분사압력이 42, 112 MPa이고, 분위기밀도가 5, 30 kg/m^3 인 조건에서 무차원시간이 $t/t_{inj} = 0.1$ 인 경우, 분무반경거리를 계측한 결과를 나타내고 있다.

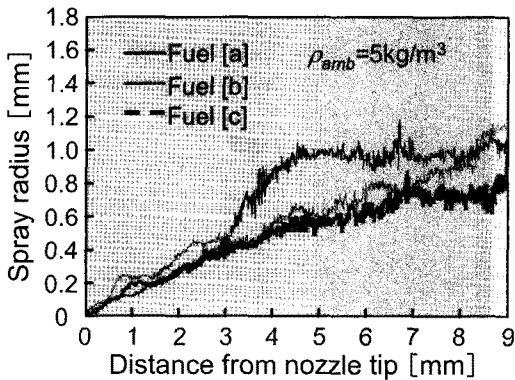


Fig. 7 Change in spray radius (at $P_{inj} = 42 \text{ MPa}$, $t/t_{inj} = 0.1$)

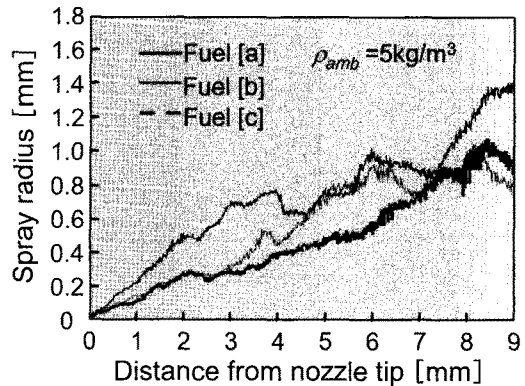


Fig. 8 Change in spray radius (at $P_{inj} = 112 \text{ MPa}$, $t/t_{inj} = 0.1$)

Fig. 7은 분사압력 42 MPa, 분위기밀도 5 kg/m^3 의 결과로, 저비점이 많은 연료 a는 고비점이 많은 연료 b, c에 비하여 반경방향으로 분무의 퍼짐성은 크지만, 모두 분무의 표면상태는 매끈매끈하게 보인다. 이에 비해 Fig. 8은 고압분사 112 MPa가 저압분사 42 MPa보다 연료조성에 의한 분무의 퍼짐성은 상당한 격차를 보인다.

고압분사는 분사속도의 증가로 액류가 갖는 난류의 생성 또는 성장에 기여하기 때문에 표면의 난류

에 있어서도 저압분사보다 빨리 성장함을 알 수 있다.

이 와의 특징을 조사하면 와의 스케일은 크지만 주파수는 극히 낮다. 또한 고비점연료에 비해 저비점연료가 와의 스케일 또는 주파수가 커진다.

Fig. 9는 분사압력 42 MPa, 분위기밀도 30 kg/m³의 결과로, 고분위기 밀도장에서 분무표면의 난류는 그림에서 알 수 있듯이 Fig. 7과 Fig. 8의 저분위기 밀도조건에 비해 심하고, 특히 연료 a에서 규칙적인 와가 형성되고 있는 것을 확인할 수 있다. 또 분무의 퍼짐성에 있어서는 저분위기 밀도보다 연료간의 차는 작지만, 여전히 저비점연료의 경우가 분무의 퍼짐성이 크다.

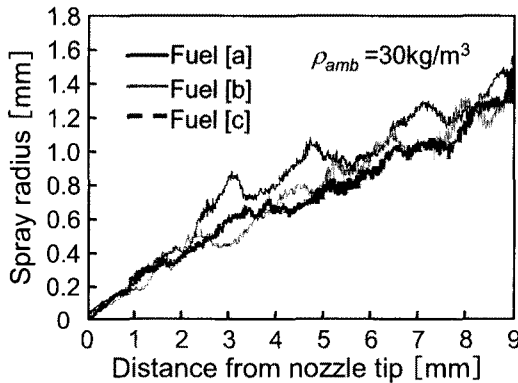


Fig. 9 Change in spray radius (at $P_{inj} = 42\text{MPa}$, $t/t_{inj} = 0.1$)

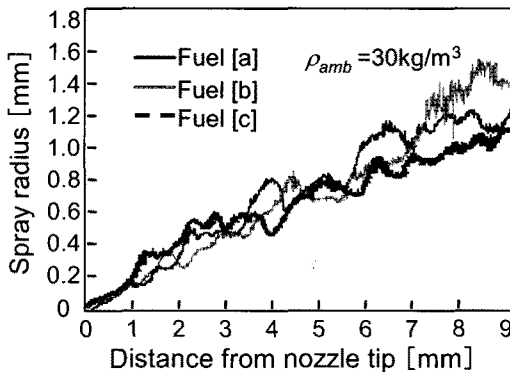


Fig. 10 Change in spray radius (at $P_{inj} = 112\text{MPa}$, $t/t_{inj} = 0.1$)

Fig. 10은 분사압력 112 MPa, 분위기밀도 30

kg/m³의 결과로, 연료 c의 와류성장이 Fig. 9의 결과에 비해 다소 격심한 분포를 나타내는 것을 알 수 있었다. 그러나 분사압력과 밀도가 높은 경우, 대체로 분무의 퍼짐성을 볼 때 연료간의 차이는 별 차이가 없었다. 이것은 기체밀도의 상승에 따라 증가된 주위기체의 전단력이 고비점연료의 표면장력 및 점성에 관계없이 크게 작용되기 때문이라고 생각할 수 있다.

4.2 증발분무의 내부구조

Azetsu 등^{(9),(10)}은 비증발장에서 분무의 내부구조를 해석하여, 분무근원부근의 난류로 인한 분류가 불안정하여 사행(蛇行) 및 지상(枝狀)의 형태로 되어 분무구조가 매우 불균일한 분포를 나타낸다고 명확히 제시한 바가 있다. 따라서 이를 해명하기 위해 연료조성 및 분위기 조건에 따라 증발장의 내부구조를 촬영하여 분무근원부근의 구조 및 액주의 증발과정을 고찰하였다.

4.2.1 연료조성의 영향

Fig. 11은 분사압력 72 MPa, 분위기온도 700 K, 연료온도 368 K, 분위기밀도 15 kg/m³의 조건에서 시간변화에 따른 Mie 산란광화상을 촬영한 연료 a, b, c의 액상분포를 나타내었다. 이 그림을 관찰하면 분무내부의 액상은 어떤 조건에서도 연료에 대하여 매우 불균일한 분포를 보여준다. 이는 정지된 기체의 분위기상태에서 고속으로 분사되는 연료와의 속도구배에 기인하게 되는 Kelvin-Helmholtz의 불안정과 또는 노즐내부의 난류의 영향⁽¹¹⁾을 생각할 수 있다.

그 결과로, 무차원시간 $t/t_{inj} = 0.25$ 에서 연료에 관계없이 액상길이는 30 mm정도이며, 내부구조 및 액상길이에는 그다지 차이는 없다.

그러나 노즐선단부의 고농도연료는 공기와 완전히 혼합되지 않아 연소실벽면에 부착될 수 있어 이 경우는 미연탄화수소가 발생할 수 있다.

일반적으로 소형디젤기관은 분공노즐의 설정위치가 피스톤 연소실의 상면으로부터 20~30 mm 아래로 설계되어 있다. 따라서 이 현상은 배기가스대책 측면에서 극히 중요한 위치가 된다. 무차원시간

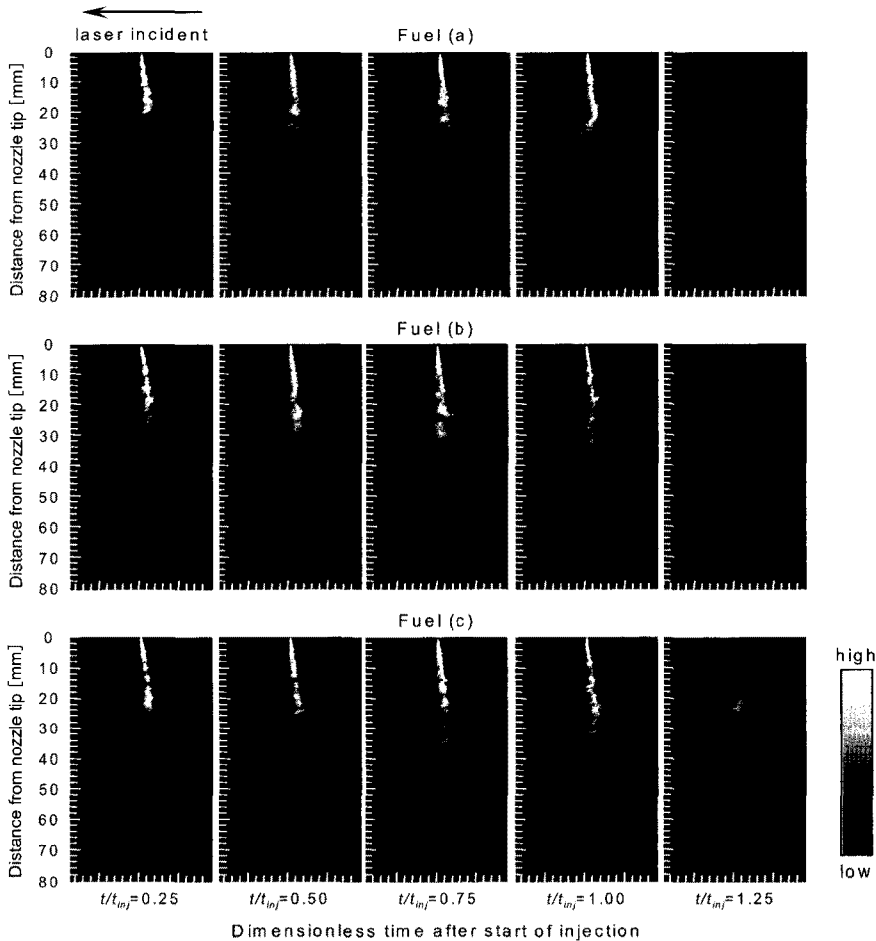


Fig. 11 Mie Scattering images with dimensionless time after start of injection on multi-component fuels(at $P_{inj} = 72 \text{ MPa}$, $T_{amb} = 700 \text{ K}$, $T_{fuel} = 368 \text{ K}$, $\rho_{amb} = 15 \text{ kg/m}^3$)

$t/t_{inj} = 0.5$ 에서 1.0사이에서는, 각 연료의 농후한 영역에서 액상길이는 각각 다르지만, 희박한 영역은 저비점성분이 많을수록 증가하며, 액상길이는 c, b, a 순으로 크다. 이것은 고비점성분인 n-헥사데칸의 증발이 늦어지기 때문이다.

또 분류 중류부이후에서는 연료 a에 비해 연료 c 경우가, 농도가 진한 부분과 옅은 부분의 차이가 대단히 크면서 매우 불균일한 분포특성을 보인다. 이것은 디젤분무에 나타나는 복잡한 와(渦)구조와 깊은 관계가 있다. 즉 이 와에 대하여 불균일성을 보여, 고비점성분의 증발지연과 더불어 연료 c에 있어서 가장 두드러진 현상이 나타난다. 또 분사중

료후인 무차원시간 $t/t_{inj} = 1.25$ 에서 연료 a에는 저비점성분이 많기 때문에 거의 액상은 나타나지 않으나, 고비점성분이 많은 연료에는 액상구조가 남게 된다.

4.2.2 분위기온도 및 연료온도의 영향

Fig. 12는 분사압력 72 MPa, 분위기온도 700 K, 연료온도 368 K, 밀도 15 kg/m^3 에서 연료 a와 연료 c의 강도분포를 시간경과에 따라 비교한 결과이다

분사초기인 $t/t_{inj} = 0.25$ 에 있어서는 도달거리가 그다지 차이가 없고, $t/t_{inj} = 0.5$ 에서는 천천히 증

발특성의 영향으로 볼 수 있는 도달거리 및 강도분포의 차가 크게 나타난다. 고비점성분인 n-헥사데칸을 많이 함유한 연료 c는, 보다 하류부까지 고강도 즉 고수밀도의 액상이 분포하고 있어, 연료과농한 불균일한 혼합기를 형성하고 있다고 생각할 수 있다.

특히 분사종료후인 $t/t_{inj} = 1.25$ 를 비교하면, 증발속도의 차가 현저하게 나타나고 있다. 이와 같이 연료 c와 같은 고비점성분을 많이 함유한 연료는

분무하류부에 연료과농한 혼합기를 형성하여 PM 배출의 원인이 될 수 있다.

Fig. 13은 분사압력 72 MPa, 분위기밀도 15 kg/m³, 무차원시간 $t/t_{inj} = 1.0$ 에서 분위기 및 연료온도의 영향을 비교한 결과이다. 각 연료에서 연료온도의 상승과 함께 증발이 촉진되어 도달거리가 짧아지고, 분무폭도 감소됨을 알 수 있다.

또 분무전체의 휘도치도 저하하여, 특히 휘도치 127.5이상의 고휘도치영역의 감소는 두드러지게

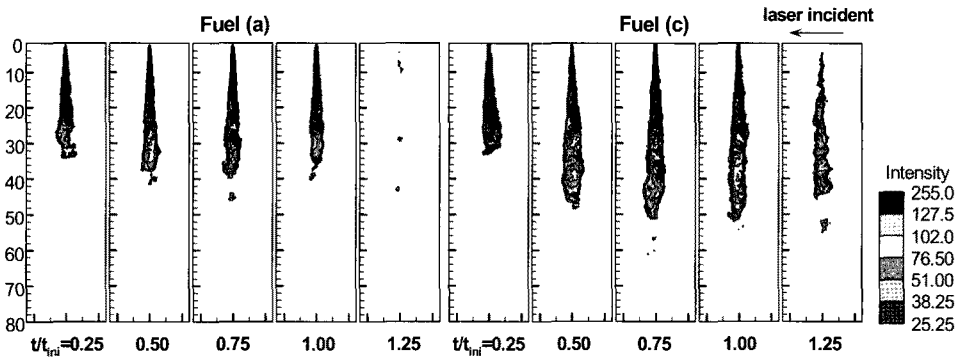


Fig. 12 Intensity contours on multi-component fuels (at $P_{inj} = 72 \text{ MPa}$, $T_{amb} = 700 \text{ K}$, $T_{fuel} = 368 \text{ K}$, $\rho_{amb} = 15 \text{ kg/m}^3$)

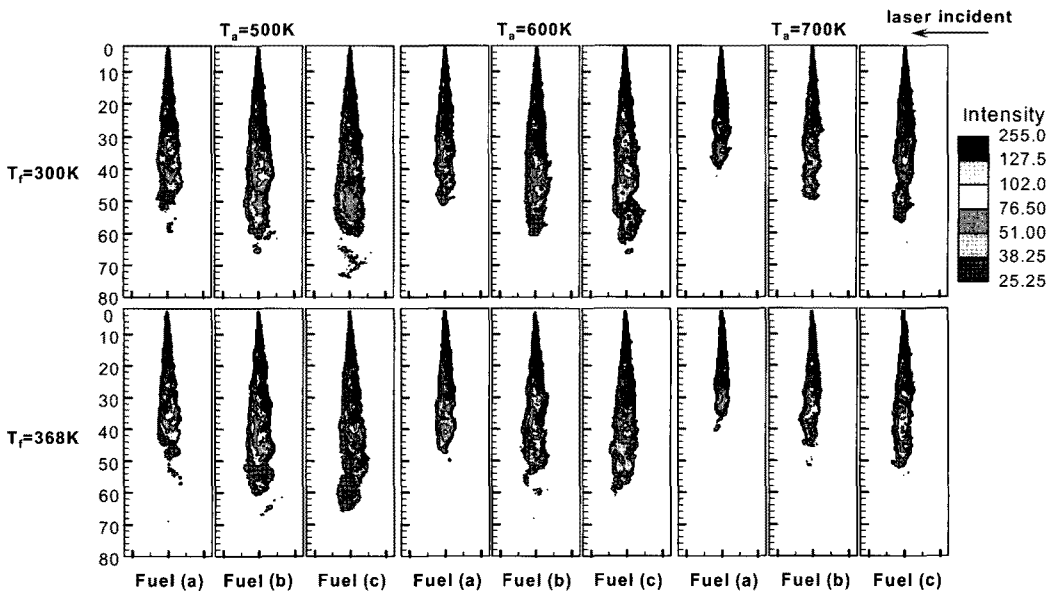


Fig. 13 Intensity contours on multi-component fuels with ambient and fuel temperature (at $P_{inj} = 72 \text{ MPa}$, $t/t_{inj} = 1.0$)

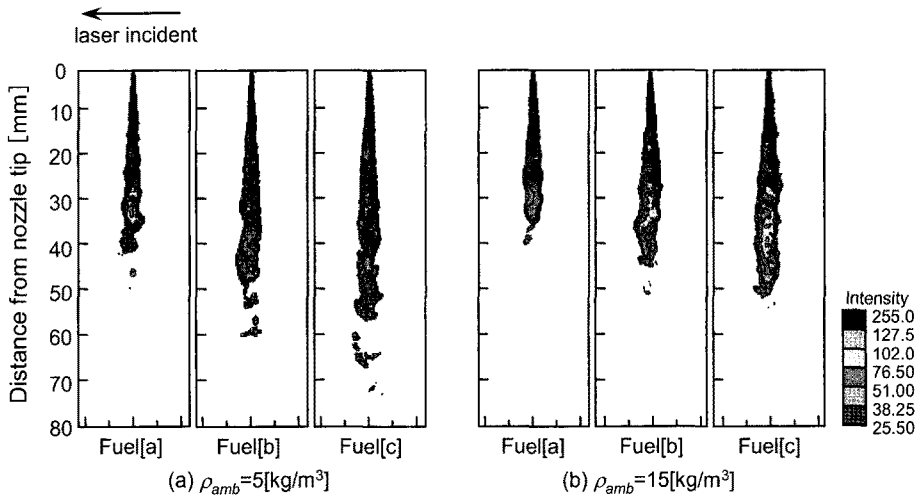


Fig. 14 Intensity contours on multi-component fuels with ambient density (at $P_{inj} = 72 \text{ MPa}$, $T_{amb} = 700 \text{ K}$, $T_{fuel} = 368 \text{ K}$, $t/t_{inj} = 1.0$)

나타난다. 또한 분위기온도가 상승하면 각 연료에 있어서 도달거리 및 휘도면적의 감소가 현저히 나타난다. 연료별 비교하면, 각 분위기 및 연료온도 조건에 있어서 역시 고비점성분을 많이 함유한 연료 c의 증발이 늦어지고 있는 것을 알 수 있다. 가장 증발이 촉진되기 어려운 조건인 분위기온도 500 K, 연료온도 300 K에 있어서 강도분포를 고찰하면 분무하류부에 저휘도의 액상이 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 특히 연료 c에서는 70 mm부근에 독립된 많은 액적이 분포하고 있고, 매우 불균일한 증기농도분포를 형성하고 있는 것을 볼 수 있다.

4.2.3 분위기밀도의 영향

Fig. 14는 분사압력 72 MPa, 분위기온도 700 K, 연료온도 368 K, 무차원시간 $t/t_{inj}=1.0$ 에 있어서 분위기밀도에 따른 강도분포의 영향을 나타난 결과이다.

그 결과로 분위기밀도의 증가에 따라 전단력이 증가하여 각 연료의 도달거리가 짧아지고, 분무반경방향의 폭도 넓어짐을 경향을 나타낸다. 그러나 연료별의 차이는 역시 연료 c가 증발이 늦어지지만, 분위기밀도의 증가에 의해 영향을 받는 것보다는 온도의 증가에 의해 더 큰 영향을 받는다는 것

을 알 수 있었다.

5. 결 론

디젤분무의 증발장에서 확대촬영 및 액적산란광 촬영에 의해 분무내부구조에 미치는 다성분 연료조성, 분위기온도 및 연료온도 등의 영향을 고찰한 결과는 다음과 같다.

(1) 저비점 연료성분이 많을수록 표면장력 및 밀도가 낮아 분무경계면에서 와류가 발생하기 쉽고, 와의 성장에 의한 분무근원부의 미립화가 더 촉진된다.

(2) 분사압력에 따라 분위기밀도가 높더라도 연료별 분무의 퍼짐성은 고비점연료의 표면장력 및 점성에 관계없이 연료별 큰 차이가 없었다.

(3) 분위기온도 및 연료온도의 상승에 따라 연료 증발이 촉진되어 분무도달거리 및 휘도면적이 현저하게 감소된다.

(4) 다성분연료는 기액이 혼재하는 2상영역을 형성함으로써, 고비점연료를 첨가비율에 따라 분무의 증발 특성이 크게 달라지므로 연료조성에 대한 최적화가 필요하다.

참고문헌

- [1] K. Akihama, et al., "Simultaneous Laser Induced Fluorescence Measurements of In-Cylinder Fuel Behavior of Different Boiling Point Components", Proc. 15th Internal Combustion Engine Symposium, Seoul, pp. 577-582, 1999.
- [2] H. Krämer, et al., "Simultaneous Mapping of the Distribution of Different Fuel Volatility Classes Using Tracer-LIF and NIR-Tomography in an IC Engine", SAE Paper No. 982467, 1998.
- [3] K. R. Browne, et al., "Fuel Property Effects on Fuel/Air Mixing in an Experimental Diesel Engine", SAE Paper No. 860223, 1986.
- [4] N. S. Ayoub, et al., "Multidimensional Computation of Multicomponent Spray Vaporization and combustion", SAE Paper No. 950285, 1995.
- [5] A. M. Lippert, et al., "Modeling of Multi-component Fuels Using Continuous Distributions with Application to Droplet Evaporation and Sprays", SAE Paper No. 972882, 1997.
- [6] 千田二郎, ほか, "多成分燃料噴霧の蒸發過程の解析モデルの提案", 日本機械學會論文集(B編), Vol. 67, No. 660, pp.2135-2140, 2001.
- [7] K. J. Myong, M. Arai, H. Suzuki, J. Senda, H. Fujimoto, "Vaporization Characteristics and Liquid Phase Penetration for Multi-component fuels", SAE Paper No. 2004-01-0529, 2004.
- [8] J. F. Ely and M. L. Huber, "NIST Thermo-physical Properties of Hydrocarbon Mixture Database (SURETRAPP) version 1.0", National Institute of Standards and Technology, 1992.
- [9] A. Azetsu, et al., "A Study on the Structure of Diesel Spray 2-D Visualization of the Non-evaporating Spray", Int. Symposium. Comodia 90, pp.199-204, 1990.
- [10] D. Tomoshia, et al., "Effect of Ambient Gas Properties for Characteristics of Non-reacting Diesel Fuel Spray", SAE Paper No. 970352, 1997.
- [11] C. Arcoumanis, et al., "Analysis of the Flow in the Nozzle of a Vertical Multi Hole Diesel Engine Injector", SAE Paper No. 980811, 1998.

저자 소개



명광재(明光在)

1968년생, 1998년 국민대학교 자동차공학과 졸업(학사), 2000년 전남대학교 기계공학과 졸업(석사), 2005년 일본 동지사대학교 기계공학과 졸업(박사), 2005.6.~2008.2. 일본교통안전환경연구소 연구원, 2008.3.~현재 조선이공대학 자동차과 전임강사



윤준규(尹俊圭)

1957년생, 1981년 조선대학교 기계공학과 졸업(학사), 1987년 경희대학교 기계공학과 졸업(석사), 2001년 명지대학교 기계공학과 졸업(박사), 2005.3~2006.2. 일본 동지사대학교 기계공학과 객원연구원, 2007.3.~현재 경원대학교 기계·자동차공학과 부교수