초임계상태 분무의 분무 특성에 관한 연구

The Study on the Spray Characteristics of Supercritical Spray

박 찬 준*

C. J. Park

ABSTRACT

The characteristics of the breakup process in supercritical spray is investigated during the injection of supercritical sulfur hexafluoride into dissimilar gases at supercritical pressures and subcritical temperature of the injected fluid. The visualization techniques used are backlighting and shadowgraph methods. The spray angles are measured and the breakup and mixing process are observed at near and supercritical conditions.

The results show that spray angles are decreased with the increase of the ratio of density ($\frac{\rho_f}{\rho_g}$). At the supercritical temperature, the spray angles in atomization region are kept nearly constant such as the typical spray angle in gas injection. The mixing process is changed radically at the temperature where $\frac{d\rho}{dT} = \frac{1}{2}\left[\frac{d\rho}{dT}\right]_{max}$ at a given pressure.

주요기술용어 : Atomization(미립화), Supercritical spray(초임계 분사), Spray regime(분무영역), Spray angle(분무각)

1. 서 론

세계 각국에서 유해 배기가스를 줄이기 위해 배기가스 규제를 강화하는 가운데, 여러 방면으로 연소효율과 배기 오염물질을 줄이려는 노력이 다방면으로 이루어졌다. 특히 최근 들어 고출력, 저소음 그리고 높은 열효율을 이루기 위해 많은 연구가 이루어졌는데 그 중에도 직접적으로 영향을 주는 것은 연료와 공기의 혼합 상태에 결정적인 영향을 주는 연료공급 장치의 분무 분열형태이다.

최근 들어 일반 저압 직접분사식 디젤기관에 대해 Feola[1] 등은 배기 오염물질 배출을 줄이기 위하여, 연료 분사 시기 및 연료유량 등이 어떤 영향을 주는지를 측정하고 모델링하여 최적 방법을 찾으려고 연구하였으며, Bracco[2]는 엔진 연소 과정에서 가장 영향을 많이 주는 것은 분무 분열형태 및 발전 과정이므로 정적인 상태와 과도기적 상태에서 가장 영향을 많이 주는 것은 분무 분열형태 및 발전 과정이므로 정적인 상태와 과도기적 상태에서 분열영역의 구조를 연구하여 모델링하기 위한 기초자료로 사용하였다.

또한 디젤엔진의 성능과 연소효율을 증진시키기 위한 접근 방법 중에 하나가 연료 분사 압력을 증가 시키는 것으로, 이 때 고압분사 과정의 특성은 일반 연료 분사할 경우와는 많이 다르다. Su 와 Farrell[3]은 고압 분사 디젤 연료분사 장치에서 인젝터 노즐 형상에 따른 영향을 연구했으며, Yunyi 와 Xuanming[4]은 가시화 장치를 이용하여 분사관봉, 분사각 등에 관한 주변 가스 온도와 압력의 영향을 연구하였다. Senda[5]등은 흡기관에 분무되는 가솔린 엔진에서 일부 엔진 운전조건에서는 흡기관의 압력이 포화 증기압력 이하로 떨어지기 때문에 순간비등(flash-boiling) 현상이 발생하므로 이 순간비등 분무에 의한 증발 및 무화과정에 대해 연구했다. 또한 Oza[6]는 연료에 열을 가한 상태에서 분사

* 서울산업대학교 기계공학과

압력, 주변 공기압력, 연료온도 및 인젝터의 열림 정도에 따른 유동특성에 대해 연구하였고, Liejard 와 Day[7]그리고 Sher 와 Elata[8] 에 의해서도 고온 분무시 분열형태가 연구되었다.

차세대 엔진의 경우 분사연료의 압력과 온도가 열역학적 임계값까지 상승 할 뿐만 아니라 주변공기의 압력도 분무연료의 임계압력까지 상승되는 경우가 발생하므로, 초임계 분무시 분무 특성에 관한 연구가 필요하다. 임계 분무 상태에 대한 연구는 Kurschat[9] 등에 의해 공급 연료의 상태가 임계 상태이고 주변공기의 압력이 진공상태인 경우, 분무시 연료의 열역학적 상태가 분무 분열형태에 많은 영향을 미친다는 것을 발견했다. 그러므로 본 논문에서는 저압에서 공급연료의 임계압력과 같은 고압까지 주변공기의 압력을 변화시면서, 열역학적 임계상태의 연료를 분무하여, 분무형태 및 분무각 등의 분무특성을 가시화 장치를 이용하여 측정하여 추후 연소효율의 향상 및 배기가스 오염물질을 줄이기 위한 기초자료로서 활용하려고 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험장치의 개략도는 그림 1 과 같이 샘플 실린더, 피스톤 펌프, 분사노즐, 고압 측정탱크로 구성되었으며, 실험에 사용된 분무연료는 독성이 없고 주변환경에 무해한 SF_6 를 사용하였다. 또한 SF_6의 임계압력과 온도는 각각 318.7K 와 37.6 bars이므로, 탄화수소 연료에 비해 SF_6는 임계온도가 낮아 약간의 가열로 초임계 상태를 만들어 줄 수 있으므로, 연료의 임계 분무상태를 연구하기에 적합한 대체 연료이다.

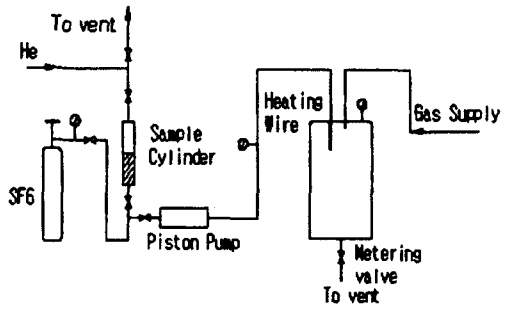

Fig. 1 Schematic of Experimental Setup

고압탱크는 내경이 102mm이고 높이가 430mm이며, 가시화를 위해 4면에 부시창을 설치하였다. 고압탱크에는 압력은 분무연료와 같고 온도는 상온인 N_2 , He 혹은 CO_2 가스로 채운 뒤 분무 연료인 SF_6를 임계값 이상으로 압력과 온도를 변화 시키면서 상단 중앙에 설치된 노즐을 통해 분사했다. 사용된 노즐의 직경은 508 μm 와 127 μm로 2 종류의 노즐(Spraying System Model 7530-SS020, 7530 -SS005)이다. SF_6 의 공급 유량을 조절하기 위해 피스톤 펌프(Gilson 305 , 50SC피스톤 헤드)를 사용하였다. 탱크 압력과 분무연료의 압력은 압력계(Omega PX302~ 1kGV)로 측정하였다. 그림 2는 분무노즐의 개략도를 보여준다. 분무연료가 노즐 출구에서 원하는 온도를 갖게 하기 위해서 분사노즐 연결 스테인레스 스틸 튜브 주위에 전기 크롬선을 감아서 분무연료를 임계온도 이상으로 가열하였고, 연료의 온도는 노즐 안 쪽으로 노즐 출구 10mm 위에 설치된 K-열전대(Omega KMQSS -020E)로 연속적으로 측정하였다. 실험 중 고압탱크에서 연료 농도를 균일하고 일정하게 유지하기 위해 일정량의 주변 가스가 유입되도록 고압탱크 상부에 흡입밸브와 허니콤(Honeycomb)을 설치하였으며, 압력탱크의 압력을 일정하게 유지하기 위해 정밀 배기 밸브가 사용되었다.

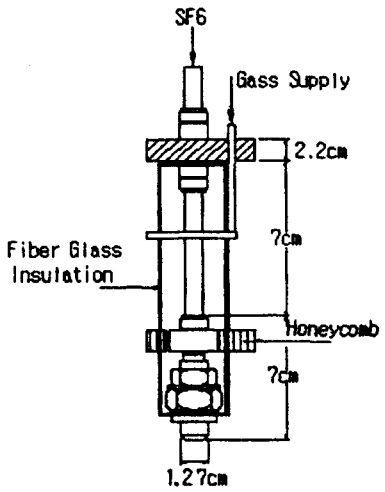

Fig. 2 Schematic of the Nozzle Assembly

본문에서 사용된 가시화 방법은 backlighting과 shadowgraph 기법이며, 발원장치로는 파장이 532 nm이고 10Hz로 작동되는 Nd:YAG 레이저 (Quanta -Ray GCR-4)가 사용되었다.

그림 3은 가시화 장치의 개략도를 보여준다. 레

이저 광선을 평행하고 고른 강도를 유지하기 위해 필터(Newport Model 900)와 초점 렌즈가 사용되었다. Backlighting 가시화에서 레이저 광선은 150mm의 직경을 갖도록 젖빛 유리에 비추어졌으며, shadowgraph 경우에도 같은 레이저광선이 사용되었다. 가시화 영상은 ICCD(Photometrics Model CH 220) 카메라와 CCD 비데오 카메라(Canon A-1)로 녹화하였다.

이 카메라들은 backlighting 이나 shadowgraph 가시화 장치에서 측상에 설치되었다. 영상분석을 위해 개인용 컴퓨터에 연결된 frame-grabber(Scion Image Capture II)가 사용되었다.

ND:YAG LaSer Spatial Filter Opal Glass ICCD Camera

Fig. 3 Optical Arrangement for Spray Visualization

실험 영역을 크게 2가지로 구분하면 첫째로는 분무 형태(spray-regime)을 측정하기 위해 back-lighting 가시화 방법을 사용하였다. 실험조건은 노즐 직경이 508 μm이고, 고압탱크 속의 주변가스는 N_2로 압력과 온도는 공급연료 SF_6와 같은 압력과 21 °C인 상태로 고정하고, 피스톤 펌프를 사용하여 SF_6를 분무하였다. 공급연료 SF_6의 압력과 온도를 각각 Pr = 1.2와 Tr = 0.923로 유지한 상태에서 SF_6 유량을 5ml/min에서 50ml/min까지 변화를 주어 Rayeigh 영역에서 미립화 영역까지 영역의 변화를 주었다.

표2.1 분무 형태 분석실험

	SF6 / N2
d (μm)	508
Mass Flowrate(kg/s)	3.8872e-6 - 3.4425e-5
Re	1175 - 14410
Weg	1.9435 - ∞
Oh	0.207e-2 - ∞
Tr	0.923 - 1.03
Pr	1.2

또한 공급연료 SF_6의 압력과 유량을 각각 Pr = 1.2와 Q=2.5 ml/min으로 유지한 상태에서 공급연료의 온도를 Tr = 0.923에서 Tr = 1.03까지 변화를 주어 초임계 상태에서의 분무 변화를 Backlighting 가시화장치를 이용하여 관찰하였다. 표 2.1은 분무 형태를 분석하기 위한 실험 조건을 보여준다.

둘째로는 노즐 직경이 127 μm이고 압력탱크의 주변가스로 CO_2, N_2 그리고 He을 사용하였으며, 주변가스의 압력과 온도는 각각 공급연료 SF_6와 같은 압력과 21 °C인 상태로 유지하고, 공급연료 SF_6의 압력을 Pr = 1.0, 1.1, 1.2, 온도를 Tr = 0.92 ~ 1.07까지 그리고 분무유량을 2.5ml, 5.0ml, 10ml로 변화를 주면서, 분무 무화 상태에서의 분무각 (spray angle)을 shadowgraph 가시화장치를 이용하여 측정하였다. 표 2.2는 분사각 측정을 위한 실험 조건을 보여준다.

표 2.2 분사각 측정 실험 조건

	SF6/N2	SF6/CO2	SF6/He
d (μm)	127	127	127
Mass Flowrate(kg/s)	9.84e-5 - 1.105e-4	9.23e-5 - 1.05e-4	9.92e-5 - 1.113e-4
Re	1022-3846	1027 -4056	1005 -4428
Weg	0.58 - ∞	0.403 - ∞	0.788e-1 - ∞
Oh	0.98e-2 - ∞	0.932e-2 - ∞	0.944e-2 - ∞
Tr	0.93 - 1.07	0.92 - 1.04	0.93 - 1.07
Pr	1.0 - 1.2	1.0 -1.2	1.0 -1.2

Weber수는 주변가스의 밀도를 기준으로 하는 아래 식과 같이 정의되었고

$$We_g = \rho_g u^2 d/\sigma_l \qquad (1)$$

초임계 상태의 가스 물성치를 구하기 위해 다음과 같이 SRK(Soave-Redlich-Kwong) 상태 방정식을 이용하여 밀도를 구하였다.

$$P = \frac{R_u T}{v-b} - \frac{a}{v(v+b)} \qquad (2)$$

여기서

$$b = 0.08664\frac{R_u T_c}{P_c}$$

$$a = 0.42748\frac{R_u^2 T_c^2}{P_c}[1+f(\omega)(1-(\frac{T}{T_r})^2)]^2$$

$$f(\omega) = 0.48+1.574\omega-0.176\omega^2$$

정확도를 높이기 위해 Peneloux 와 Rauzy [10] 에 의해 계산된 비체적 교정값을 SRK상태 방정식에 대입하였다.

$$c = 0.40768(0.29441-Z_{RA})\frac{RT_c}{P_c}$$

여기서

$$Z_{RA} = 0.29056-0.08775\omega$$

그림 4와 5는 온도변화에 따른 SF_6의 밀도와 밀도 변화율을 보여준다.

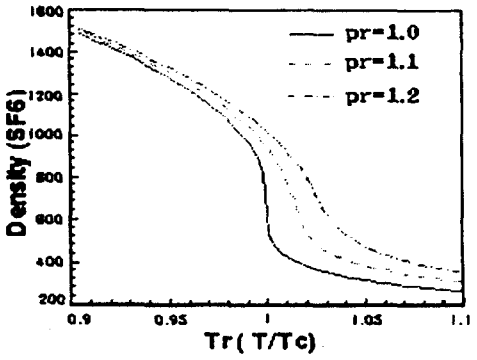

Fig. 4 Density of SF_6 at Pr=1.0, 1.1, 1.2

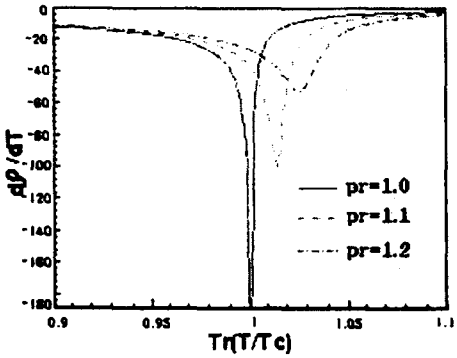

Fig.5 Density Derivative of SF_6 at Pr=1.0,1.1,1.2

SF_6 의 표면장력은 Wu와 Webb[11]의해 발표된

$$\sigma(t) = \sigma_a(1-T_r)^{\mu},$$

$$\sigma_a = 55.13\pm2.6 \quad dyn/cm$$

$$\mu = 1.285 \pm 0.016$$

을 이용하여 구하였다. Ohnesorge수는 $Oh = \mu_f / \sqrt{\rho_f d \sigma} = \sqrt{We_f} / Re$ 이고, 여기서 점성계수는 Chung방법과 압력의 영향을 고려하여 Reichenberg방법을 사용하였다.[10]

3. 결과 및 고찰

Backlighting을 이용한 가시화 측정을 통하여 그림 6과 7과 같이 분사영역을 분석하기 위해, 주변가스가 N_2이며 압력이 Pr=1.2인 실린더에 압력이 Pr=1.2인 공급연료 SF_6를 분사하여 분사영역을 분석하였다. 그림 6은 Tr=0.923인 경우 유량이 5ml/min에서 50ml/min으로 변할 때 유량 변화에 따른 분무특성을 보여준다.

$$SF_6/N_2, \mathrm{Pr}=1.2, Tr=0.923$$

$SF_6/N_2, \mathrm{Pr}=1.2, Tr=0.923$

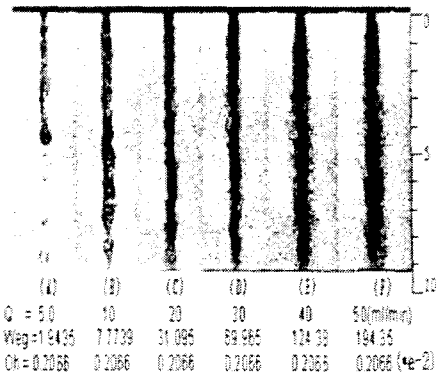

Fig 6 SF_6/N_2 Sprays at Different We_g for T_r = 0.923

낮은 Weg값에서(그림 6.A) 노즐 출구 근처에서는 파동적인 경계면을 이루나 하류에서는 액적분열이 발생하며, 액적 크기는 노즐 지름보다 큰 Rayleigh 분열현상을 보여준다. Weg 값이 증가하면(그림 6.B) 파동적 경계면이나 액적 분열현상이 노즐 근처로 이동하며 이 현상은 first wind-induced 영역에 속한다. 그림 6.C와 6.D같이 Weg

값을 더 증가시키면, 대칭 파동적 경계면 현상이 나타나고, 액적분열이 하류에서 발생하는 second wind-induced 영역에 속한다. Weg값이 그림 6.E - F와 같이 더 증가되면, 액적이 액체 코어에서 분리되며 유량이 늘어날수록 분리점이 상류로 이동하고 경계면이 넓어지며 미립자 크기가 더 작아지는 미립화 영역에 속한다. 가시화 결과는 혼합 특성 잘 보여주는데, 이는 Weg값와 Oh값을 기준으로 영역을 구분한 Faeth [12] 의 결과와 잘 일치하며, 노즐 근처와 분사 중심축 선상은 농후한 액체연료와 밀집된 액적에 의해 빛이 차단되어 생기는 어두운 부분과 어두운 부분의 외곽에 형성되는 촘촘한 점과 같은 직물모양의 미립자의 분포를 보여준다.

$SF_6/\ N_2$, Pr=1.2, Q=2.5ml/min

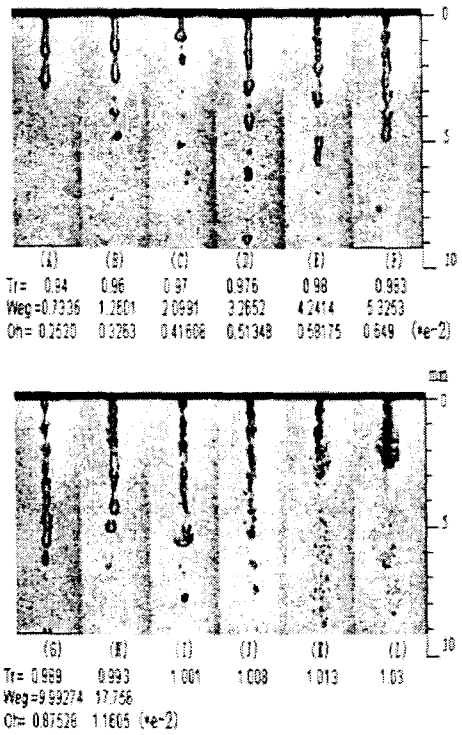

Fig 7 SF_6/N_2 Sprays at Pr = 1.2 and T_r = 0.94 - 1.03

그림 7은 주변가스가 N_2이고 압력이 공급연료의 임계압력을 초과하는 Pr=1.2로 유지된 상태에서 주위와 같은 압력의 SF_6를 일정 유량(2.5ml/min)을 유지한 상태에서 온도를 Tr=0.94에서 Tr=1.03까지 변화시키며 분사시킬 때 발생하는 분무현상을 보여준다. 임계상태를 초과하는 상태에서는 표면장력을 상실하여 Weg값이나 Oh값이 무한대가 되기 때문에 주어지지 않았다. Tr=0.94 인 경우는 Rayleigh 영역에 속하고, Weg값이 증가 할 수록 노즐 출구에 버섯모양의 기둥을 형성하는 wind - induced 영역에서 미립화 영역으로 변화한다. 그러나 임계상태에 접어 들면, 여러 크기의 액적을 형성하며 산란되는 것을 볼 수 있다. 그러나 급격한 분무현상의 변화는 임계온도인 Tr=1.0에서 일어나는 것이 아니라 그림 5에서 와 같이 압력에 따라 밀도의 변화율이 $\frac{d\rho}{dT} = \frac{1}{2}\left[\frac{d\rho}{dT}\right]_{max}$ 로 급격히 변화하는 온도에서 일어나며, 이 현상은 일반적인 분사현상과 확연히 다르다는 것을 알 수 있다. 또한 온도가 Tr=1.03까지 올라가면 액적 형성이 노즐 출구 근처에서 이루어지는 것을 알 수 있다.

$SF_6/\ CO_2$, Pr=1.2, Q=5ml/min

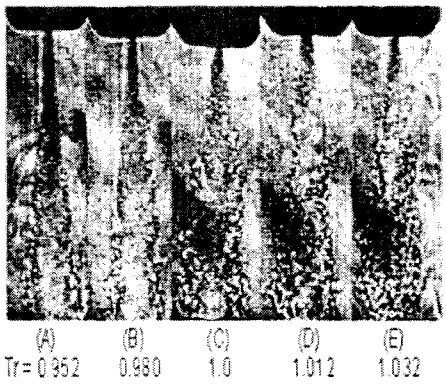

Fig 8 Shadowgraphs of SF_6/CO_2 Sprays at Different Tr

그림 8은 주변가스가 CO_2이고 공급연료의 압력이 Pr=1.2인 경우 shadowgraph 가시화 방법을 이용하여 공급연료의 온도를 Tr=0.95에서 Tr=1.03까지 변화시키며 분무 형태를 가시화하였다. Tr=0.95인 경우 분사 중심축 선상에 어두운 부분을 보이며, 하류 중심에는 섬세한 구조를 외곽에는 거친 구조를 갖는 액체분사 형태를 갖는다. 그러나 온도가 높아지면서 중심축 어두운 부분이 줄어들면서

액적에 의한 거친 구조의 범위가 넓어지는 현상을 보여준다. 또한 온도가 임계온도보다 높아지면 중심축 상의 액체 코어부분과 섬세한 구조 영역이 사라지고 거친 구조를 갖는 가스분사 형태를 보여준다.

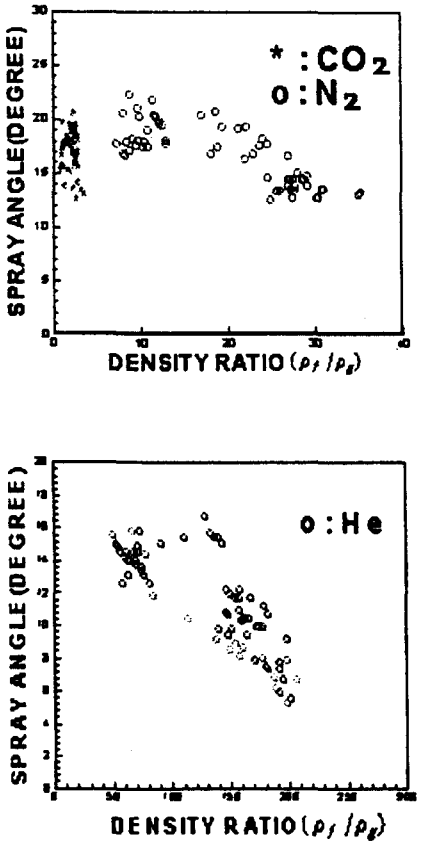

Fig 9 Effects of Density Ratio (ρ_f / ρ_g) on the Spray Angle

분무각은 shadowgraph 가시화 방법을 이용하여 표 2.2와 같이 주변가스가 He, N_2, 그리고 CO_2인 경우, 분사 경계선의 연장선에 의해 형성되는 각을 측정하여 결정하였다. 측정된 분사각의 불확실성은 20 ~ 30%의 오차를 갖는다. 그림 9는 주변가스가 N_2, CO_2에서 밀도비($\frac{\rho_f}{\rho_g}$)의 함수로 분무각의 변화를 보여준다. 밀도비가 증가할 수록 분무각이 완만하게 감소하는 것을 보여주며, 밀도비가 25보다 적은 경우는 일반적인 난류 원뿔 노즐일 경우의 분사각과 비슷한 20°을 유지한다. 이는 온도가 임계온도 이상으로 높아지면 일반 가스 분무시와 같은 현상을 보여준다. 그러므로 초임계 분사시 분무 길이가 줄어들어 연소기의 크기를 줄일 수 있음을 알 수 있다. 그림 10은 주변가스가 He인 경우 밀도비 ($\frac{\rho_f}{\rho_g}$)의 변화에 따른 분사각의 변화를 보여주는데, 이 경우는 밀도비가 증가하여 Reitz[13]가 유도한 미립화 영역을 예측하는 다음 식에 따라 미립화 영역이 아닌 wind-induced 영역에 속한다.

$$\left(\frac{\rho_f}{\rho_g}\right)^{1/2} < 9.2, \text{ for } \frac{\rho_f}{\rho_g}\left(\frac{Re_f}{We_f}\right)^2 > 1$$

그러므로 밀도비가 증가 할 수록 급격한 분무각의 감소 현상을 보여준다.

4. 결론

아임계 및 초임계 상태의 공급연료(SF_6)를 분사연료의 임계압력과 같거나 높은 압력을 갖는 주위가스(N_2, CO_2, He)에 분사하여 생기는 분사영역을 가시화하여 분무분열 형태와 분무각을 측정하였다.

아임계 상태의 가시화 결과는 기존 분사 영역과 같은 현상을 보여주며, 일반적인 액체분사 형태를 유지하나 초임계 상태에서는 압력에 따른 임계온도가 아니라 밀도의 변화가 심하게 일어나는 $\frac{d\rho}{dT} = \frac{1}{2}\left[\frac{d\rho}{dT}\right]_{max}$인 온도에서 분무형태가 급격히 변한다.

분무각은 밀도비 (ρ_f / ρ_g)가 증가할 수 록 감소하며, 미립화 영역이면서 임계온도 이상에서는 일반 난류 가스 분사각인 20°에 근접하는 분무각을 갖는다. 이는 초임계 분사시 분무 길이가 짧아져서 연소기의 크기를 줄일 수 있음을 보여준다.

기호설명

d : 노즐지름 [μm]
Oh : 오네소게수(Ohnesorge number)
P : 압력 [Pa]
Pr : 환산압력(reduced pressure)
Re : 레이놀즈수(Reynolds number)

R_u : 일반기체상수(universal gas constant)

T : 온도 $[^{\circ}C]$

Tr : 환산온도(reduced temperature)

u : 분류속도 $[m/s]$

We : 웨버수(Weber number)

그리스 기호

μ : 점성계수 $[Pa \cdot s]$

ρ : 밀도 $[kg/m^3]$

σ : 표면장력 $[dyn/cm]$

ω : acentric factor

아래첨자

c : 임계(critical)

f : 연료

g : 가스

후 기

이 논문은 서울산업대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. M. Feola, P. Pelloni, G. Cantore, G. Bella, P. Casoli and G. Toderi, "Optimization of Injection Law for Direct Injection Diesel Engine", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 114, July, pp. 544-552, 1992.
2. F.V. Bracco, "Modeling of Engine Sprays", SAE Paper 850394, 1985.
3. T.F. Su and P.V. Farrell, "Nozzle Effect on High Pressure Diesel Injection", SAE Paper 950083, 1995.
4. G. Yunyi and L. Xuanming, "The Effect of Ambient Gas Temperature and Density on the Development and Wall Impingement of High-Injection - Pressure Diesel Fuel Sprays", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 115, pp. 777-780, 1993.
5. J. Senda, Y. Hojyo and H. Fujimoto, "Modeling on Atomization and Vaporization Process in Flash Boiling Spray", JSAE Review, vol. 15, pp. 291-296, 1994.
6. R.D. Oza, "On the Mechanism of Flasing Injection of Initially Subcooled Fuels", Journal of Fluids Engineering, Vol. 106, pp. 105-109, 1984.
7. J. H. Lienhard and J. B. Day, "The Breakup of Superheated Liquid Jets", Journal of Basic Engineering, September, pp. 515-522, 1970.
8. E. Sher and C. Elata, "Spray Formation from Pressure Cans by Flasing", Ind. Eng. Chem., Process Des. Dev., Vol. 16, No. 2, pp. 237-242, 1977.
9. T. Kurschat, H. Chaves, and G.E.A. Meier, "Complete Adiabatic Evaporation of Highly Superheated Liquid Jets", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 236, pp. 43-59, 1992.
10. R.C. Reid, J.M. Prausnitz, and B.E. Poling, "The Properties of Gases & Liquids," 4th Edition, McGraw-Hill, 1988.
11. E.S. Wu and W.W. Webb, "Critical Liquid-Vapor Interface in SF_6. II. Thermal Excitations, Surface Tension, and Viscosity", Physical Review A, Vol. 8, No. 4, pp. 2077-2084, 1973.
12. G.M. Faeth, "Structure and Atomization Properties of Dense Turbulent Sprays," Twenty-third Symp. (Int.) on Combust., The Combustion Institute, pp. 1345-1352
13. R.D. Reitz and F.V. Bracco, "Mechanism of Breakup of Round Liquid Jets," Encyclopedia of Fluid Dynamics, Vol. 3, New York, Gulf Pub. Co., 1986.