

# 디젤 분무와 천연 가스 분류의 거동 특성에 관한 기초 연구 A Basic Study of the Behavior Characteristics of Diesel Spray and Natural-gas Jet

염정국 · 김민철  
J. K. Yeom and M. C. Kim

(접수일 : 2009년 3월 2일, 수정일 : 2009년 4월 15일, 채택확정 : 2009년 6월 24일)

**Key Words** : Ambient Pressure(주위 기체 압력), Injection Pressure(분사 압력), Spray(분무), Jet(분류), Tip Penetration(선단도달거리), Mixture Formation(혼합기 형성), Entrainment(도입)

**Abstract** : This basic study is required to examine spray or jet behavior depending on fuel phase. In this study, analyses of diesel fuel(n-Tridecane, C<sub>13</sub>H<sub>28</sub>) spray and natural gas fuel(Methane, CH<sub>4</sub>) jet under high temperature and pressure are performed by a general-purpose program, ANSYS CFX release 11.0, and the results of these are compared with experimental results of diesel fuel spray using the exciplex fluorescence method. The simulation results of diesel spray is analyzed by using the combination of Large-Eddy Simulation(LES) and Lagrangian Particle Tracking(LPT) and of a natural gas jet is analyzed by using Multi-Component Model(MCM). There are two study variables considered, that is, ambient pressure and injection pressure. In a macroscopic analysis, the higher ambient pressure is, the shorter spray or jet tip penetration is at each time after start of injection. And the higher injection pressure is, the longer spray or jet tip penetration is at each time after start of injection. When liquid fuel is injected, droplets of the fuel need some time to evaporate. However, when natural gas fuel is injected, the fuel does not need time to evaporate. Gas fuel consists of minute particles. Therefore, the gas fuel is mixed with the ambient gas more quickly at the initial time of injection than the liquid fuel is done. The experimental results also validate the usefulness of this analysis.

## 1. 서 론

자동차 엔진에 있어서 연소제어를 통한 유해배기 가스의 저감을 시도하는 방법은 중요하다. 연료가 분사노즐로부터 분사되어진 후 그 분사된 연료입자와 주위 기체(Ambient gas)와의 최적화된 혼합기형성(Mixture formation)은 그 연소제어를 가능하게 한다. 그리고 사용연료의 상태에 따라 연료와 주위 기체의 혼합기형성에 그 차이는 뚜렷하다. 실제로 디젤(Diesel)연료와 천연가스(CNG)연료를 적용한 자동차의 연비와 성능에 차이가 난다. 이를 위한 선행연구로써 연료분무의 구조해석을 통해 보다 고도의 혼합기형성 제어에 관한 기초연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 액상연료(n-Tridecane, C<sub>13</sub>H<sub>28</sub>)를

사용하여 고온·고압장에 있어서 엑시플렉스 형광법(Exciplex fluorescence method)에 의해 구한 실험결과<sup>1)</sup>와 범용 유동해석 프로그램인 ANSYS CFX 11.0<sup>2)</sup>를 이용해 구한 수치해석 결과를 비교·검토하여 액체상태(Liquid-phase)인 연료사용시의 증발디젤분무의 거동해석을 수행하였다. 또한 동일한 분위기에 있어서의 기체상태(Gas-phase)인 천연가스연료(Methane, CH<sub>4</sub>)를 사용한 경우의 수치해석 결과를 각 조건에 따라 비교·검토하여 고온·고압장에 있어서의 천연가스분류의 거동해석에 대해서도 고찰하였다. 실험변수로서는 분무(Spray) 및 분류(Jet) 구조에 큰 영향을 미치는 주위기체의 압력(밀도)<sup>1)</sup>과 연료의 분사압력<sup>3)</sup>으로 설정했다.

## 2. 실험조건

Table 1은 액상연료(n-Tridecane, C<sub>13</sub>H<sub>28</sub>)을 사용

염정국(책임저자) : 동아대학교 기계공학부  
E-mail : michael.love.kim@gmail.com, Tel : 051-200-7640  
김민철 : 동아대학교 대학원

한 실험조건을 나타낸다. 용기내의 분위기조건은 실제 직분식 디젤 기관의 분사개시초기의 실린더 내 분위기를 모사한 고온·고압의 분위기이다. 실험변수가 주위압력(밀도)인 경우는 분위기온도  $T_a=700\text{K}$ , 분위기압력(배압,  $p_a$ )은 주위기체의 밀도( $\rho_a$ )를  $5.0\text{kg/m}^3$ ,  $8.2\text{kg/m}^3$  및  $12.3\text{kg/m}^3$ 로 설정하기 위하여  $1.04\text{MPa}$ ,  $1.70\text{MPa}$  및  $2.55\text{MPa}$ 로 각각 설정했다. 분사압력  $p_{inj}=72\text{MPa}$ 에 대해서 분사기간은  $1.54\text{ms}$  이고, 분사연료량은  $12\text{mg}$ 이다. 그리고 실험 변수가 분사압력인 경우는 분위기온도  $T_a=700\text{K}$ , 분위기압력  $p_a=2.55\text{MPa}$ 로 일정한 조건에서 변수인 분사압력( $p_{inj}$ )을  $22\text{MPa}$ ,  $42\text{MPa}$ ,  $72\text{MPa}$  및  $112\text{MPa}$ 로 각각 설정하고 분사연료량을  $12\text{mg}$ 로 설정하기 위해 분사기간을  $2.82\text{ms}$ ,  $1.98\text{ms}$ ,  $1.54\text{ms}$  및  $1.24\text{ms}$ 로 설정하였다.

Table 1 Ambient and injection pressure conditions considered in the experiment (for C13H28)

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		$\text{N}_2$ gas
Ambient temperature $T_a$ [K]		700
Injection quantity $Q_{inj}$ [mg]		12.0
Injection duration $t_{inj}$ [ms]		1.54
Ambient pressure conditions		
Ambient pressure $p_a$ [MPa]		1.04,1.70,2.55
Ambient density $\rho_a$ [ $\text{kg/m}^3$ ]		5.0,8.2,12.3
Injection pressure $p_{inj}$ [MPa]		72
Injection pressure conditions		
Injection pressure $p_{inj}$ [MPa]		22,42,72,112
Ambient pressure $p_a$ [MPa]		2.55

### 3. 해석방법

#### 3.1 LES(Large Eddy Simulation) Model 의 지배 방정식

본 연구에서는 디젤분무에 대해 LES Smagorinsky 난류모델을 적용하고, 천연가스분류에 대해서는 표준  $k-\epsilon$  모델을 적용하였다. 천연가스분류는 기초적 분류형상과 분류구조해석을 위해서 분사연료와 주위 기체가 모두 기체로 이루어지는 다성분모델(Multi-component model)을 적용하여 기존의 난류 모델을 사용하였다. 디젤 분무에 있어서는 Tsukasa 등<sup>4)</sup>,

Ville Vuorinen 등<sup>5)</sup> 및 Tomasz G. Drozda 등<sup>6)</sup>의 연구에서도 볼 수 있듯이 최근에 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 모델을 LES 모델로 대체하는 방법이 많이 사용되고 있다. 따라서 보다 나은 결과를 도출하기 위하여 LES 모델을 사용하였다. LES 모델은 비교적 큰 소용돌이(Eddies)와 작은 소용돌이의 거동에 있어서의 차이에 기인하는 광범위한 영역에 관한 해석이다. 비교적 작은 소용돌이는 거의 등방성(Isotropic)이므로 일반적인 거동특성을 가진다. 반면에 평균 유동(Mean flow)과 상호작용을 하고 이 유동으로부터 에너지를 빼앗는 큰 소용돌이는 보다 이방성(Anisotropic)이며 거동특성은 경계조건, 자중(Body forces)과 같은 해석영역의 기하학적 구조에 의해 지배된다. 모든 소용돌이의 집합적인 거동을 고려하는 RANS 방정식은 하나의 난류모델에 의해 해석이 수행되지만, LES 모델은 시간평균(Time-averaging) 대신 공간 필터링 수행(Spatial filtering operation)을 통해 비교적 큰 소용돌이와 작은 소용돌이로 분리한다. 대규모의 변동운동에 대하여 해석을 하고, 소규모 운동에 대하여서는 SGS(Sub-Grid Scale) 난류모델을 사용한다. 가장 큰 소용돌이에 대한 해석의존도는 광범위하게 적용할 수 있는 모델의 해석을 어렵게 하기 때문이다.

비정상(Unsteady) Navier-Stokes 방정식

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (1)$$

여기서,  $U_i$  :  $i$ 성분에 대한 속도

$p$  : 압력

$x_j$  :  $j$  성분의  $x$  방향

$\mu$  : 점성계수(Viscosity)

LES 모델은 대규모 성분과 소규모 성분에 있어서 유동변수의 운동과 분해에 관한 방정식의 필터링에 관한 것이므로 임의의 유동변수  $f$ 는 다음과 같다.

$$f = \bar{f} + f'$$

여기서,  $\bar{f}$  : 체적 평균에 의해 정의된 대규모 성분

$$\bar{f}(x_i, t) = \int_{Vol} G(x_i - x_i') f(x_i', t) dx_i' \quad (2)$$

여기서,  $G(x_i - x_i')$  : 필터함수(Gaussian filter)

LES 연속 방정식(LES continuity equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{U}_i)}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

전체 체적을 평균하고 밀도변동을 무시한 필터 조작된 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.

LES 운동량 방정식(LES momentum equations)

$$\frac{\partial(\rho \overline{U}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \overline{U}_i \overline{U}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 \overline{U}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial(\rho \tau_{ij})}{\partial x_j} \quad (4)$$

여기서,  $\overline{U}_i$  :  $i$ 성분에 대한 평균속도

$\overline{p}$  : 평균압력

$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{U}_i \overline{U}_j$  : sub-grid scale(SGS) 응력

Smagorinsky<sup>7)</sup>의 SGS 모델은 아주 작은 소용돌이(Smallest eddies)는 거의 등방성이므로 Boussinesq<sup>7)</sup>의 가설이 해석된 유동(Resolved flow) 중에 미해석된 소용돌이(Unresolved eddies)의 영향을 예측하기에 적합하다고 제안한다. 따라서 전응력(whole stress)  $\tau_{ij}$ 은 필터링된 대규모 유동에서의 변형률텐서의 절대값( $|\overline{S}_{ij}|$ )에 비례한다.

SGS 난류 모델은 다음과 같다.

$$\tau_{ij} = -2\mu_{SGS} \overline{S}_{ij} + \frac{1}{3} \tau_{kk} = -\mu_{SGS} \left( \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{3} \tau_{kk} \quad (5)$$

여기서,  $\mu_{SGS}$  : SGS 점성계수

모델에 적용된 지배방정식은 ANSYS CFX의 방정식을 그대로 사용하였다.

### 3.2 입자추적모델(Particle Tracking Model)

디젤연료분무에 관하여서는 다상모델(Multi-phase model) 중에서 입자전달이론(Particle transport theory)을 적용하고, 라그랑지적 관점에서의 유동에 의한 연료분사궤도를 추적하였다(Lagrangian particle tracking).

연속유체 내에서 불연속적으로 운동하는 입자를 고려하면, 입자가속에 영향을 주는 입자상에 작용하는 힘들은 입자와 유체간의 속도 차와 입자에 의한 유체간의 변위 차에 기인한다. 입자이동에 대한 방정식들은 다음과 같이 유도된다.

입자이행(Particle Translation)

$$\frac{d\vec{r}_p}{dt} = \vec{U}_p \quad (6)$$

여기서,  $\vec{r}_p$  : 입자 이행거리

$\vec{U}_p$  : 입자 평균속도

입자운동량(Particle Momentum)

$$m_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} = \vec{F} \quad (7)$$

$$\vec{F} = \vec{F}_D + \vec{F}_B + \vec{F}_R + \vec{F}_{VM} + \vec{F}_P + \vec{F}_{BA}$$

- $\vec{F}_D$  : 입자상에 작용하는 항력(Drag force)
- $\vec{F}_B$  : 중력으로 인한 부력(Buoyancy force)
- $\vec{F}_R$  : 회전력(Forces due to domain rotation)
- $\vec{F}_{VM}$  : 가상질량힘(Virtual mass force)
- $\vec{F}_P$  : 기압경도력(Pressure gradient force)
- $\vec{F}_{BA}$  : Basset 힘(Basset force)

여기서,  $m_p \frac{d\vec{U}_p}{dt}$ 는 가상질량항의 특수한 형태에 의하여 수정될 수 있다.

### 3.3 분열모델(Breakup Model)

액적(Droplet)이 기체유동에 노출되면 아주 큰 변형이 웨버수(Weber number)에 의해 진행된다.

Table 2 Ambient and injection pressure conditions considered in the analysis (for C<sub>13</sub>H<sub>28</sub>)

Bore × Stroke	[mm]	92 × 95
Diameter of hole	$d_n$ [mm]	0.2
Length of hole	$L_n$ [mm]	1.0
Ambient temperature	$T_a$ [K]	700
Ambient gas		N <sub>2</sub> gas
Fuel		n-Tridecane
Injection quantity	$Q_{inj}$ [mg]	12.0
Injection duration	$t_{inj}$ [ms]	1.54
Total number of hexahedron		950918
Total number of nodes of mesh		977850
Ambient pressure conditions		
Ambient pressure	$p_a$ [MPa]	1.04,1.70,2.55
Injection pressure	$p_{inj}$ [MPa]	72
Injection pressure conditions		
Injection pressure	$p_{inj}$ [MPa]	22,42,72,112
Ambient pressure	$p_a$ [MPa]	2.55

$$\text{웨버수(Weber Number)} : We = \frac{\rho_F V_{slip}^2 r_P}{\sigma} \quad (8)$$

여기서,  $\rho_F$  : 액체밀도

$V_{slip}$  : 액체와 가스 사이의 상대속도

$r_P$  : 액적반지름(Droplet radius)

$\sigma$  : 표면장력

Table 3 Ambient and injection pressure conditions considered in the analysis (for CH<sub>4</sub>)

Bore × Stroke	[mm]	92 × 95
Diameter of hole	$d_n$ [mm]	1.0
Length of hole	$L_n$ [mm]	1.0
Ambient temperature	$T_a$ [K]	700
Ambient gas		Air
Fuel		Methane
Injection duration	$t_{inj}$ [ms]	10
Total number of hexahedron		156064
Total number of nodes of mesh		165078
Ambient pressure conditions		
Ambient pressure	$p_a$ [MPa]	1, 3, 5
Injection pressure	$p_{inj}$ [MPa]	6
Injection pressure conditions		
Injection pressure	$p_{inj}$ [MPa]	3, 6, 9
Ambient pressure	$p_a$ [MPa]	2

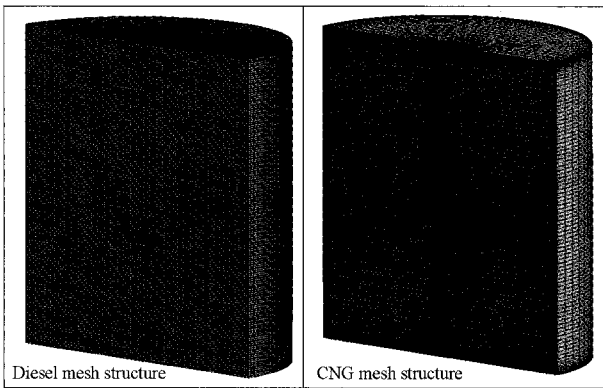


Fig. 1 Mesh structure

웨버수에 따른 분열형태는 다음과 같다.

- Vibrational breakup :  $We < 12$
- Bag breakup :  $12 < We < 50$
- Bag-and-stamen :  $50 < We < 100$
- Sheet stripping :  $100 < We < 350$
- Catastrophic breakup :  $350 < We$

본 해석에 적용된 분열모델은 1차 분열모델인 EBM(Enhanced Blob Method)과 2차 분열모델인 ETAB(Enhanced Taylor Analogy Breakup)이다.

### 3.4 해석조건

Table 2와 3에 본 연구의 해석조건을 나타내며, 사용한 연료는 액상(Liquid-phase)인 n-Tridecane (C<sub>13</sub>H<sub>28</sub>)과 기상(Gas-phase)인 Methane(CH<sub>4</sub>)이다.

여기서 노즐입구의 직경, 해석모델의 격자수, 분사압력 및 분위기압력의 범위가 다르기 때문에 Table 2와 3으로 분리하여 비교하였다.

해석조건은 각 실험조건과 동일하게 설정하였으며, 사용된 변수도 동일하게 분위기압력( $p_a$ )과 분사압력( $p_{inj}$ )으로 설정하였다. Fig. 1은 본 해석에 사용된 각각의 연료에 대한 격자구조를 나타낸다.

본 연구에서는 액적 발생 후 신속히 증발한다고 가정했기 때문에 액적 간의 충돌현상<sup>8)</sup>은 고려하지 않았다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 CFX를 사용한 수치해석 결과

#### 4.1.1 자유분무 및 분류의 거시적 연구 결과

Fig. 2는 분위기압력  $p_a=1.04\text{MPa}$ 과 분사압력  $p_{inj}=72\text{MPa}$  일 때, 분사개시 후 1.10ms에서 디젤분

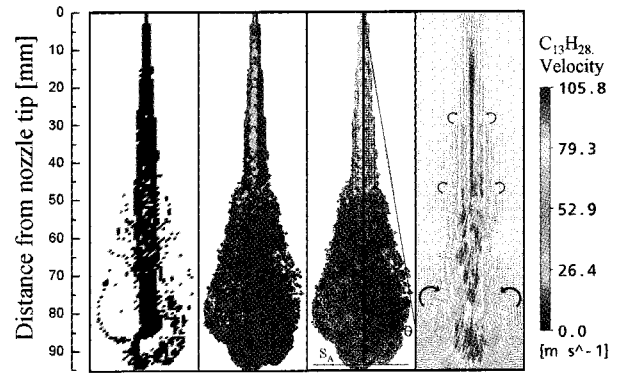


Fig. 2 2-D and 3-D images of diesel spray volume at the injection pressure of 72MPa and at the ambient pressure of 1.04MPa and at the time of 1.10ms after injection start

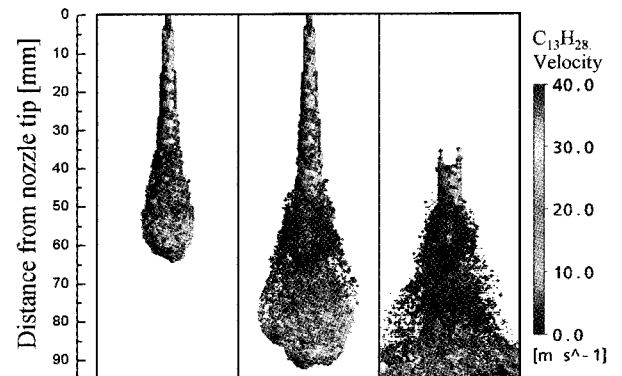


Fig. 3 3-D images of diesel spray shape and droplets and vortex structure at each time of 0.60ms, 1.05ms, and 1.80ms after injection start colored by C13H28 velocity

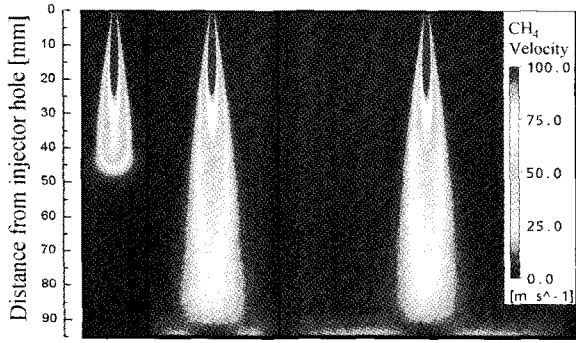
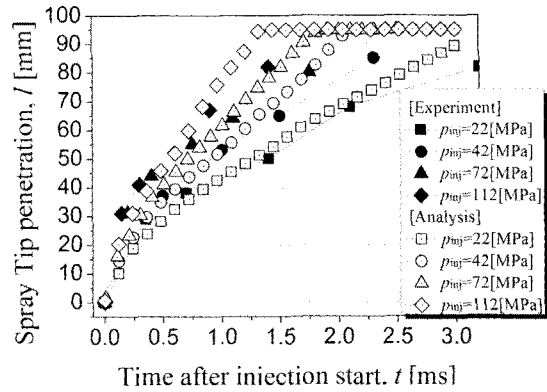
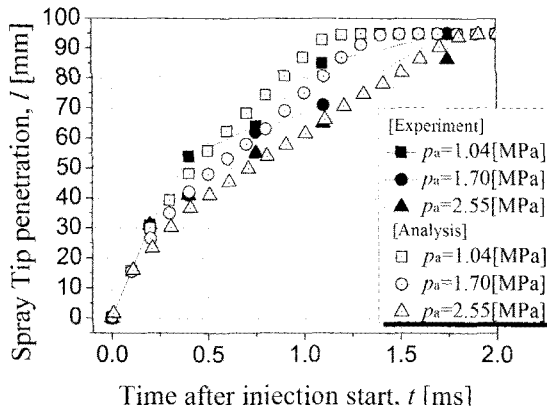


Fig. 4 2-D images of CNG jet shape and vortex structure at each time of 1.0ms, 5.0ms, and 10.0ms after injection start colored by CH4 velocity

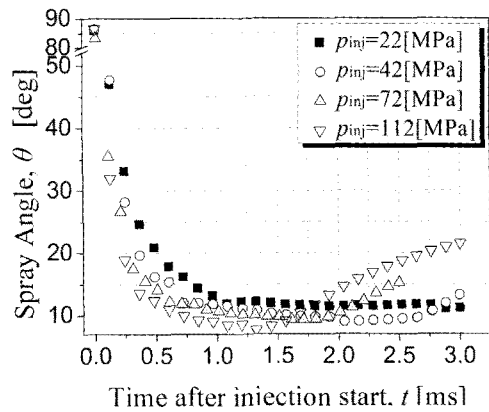
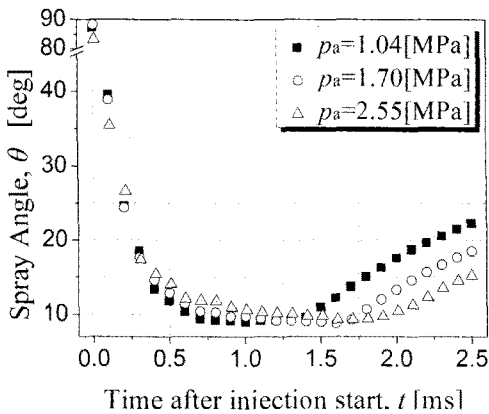
무의 부피를 2-D와 3-D를 사용하여 부피분율(Volume fraction)과 속도벡터로 나타낸 것으로써 기·액상 연료의 부피를 모두 포함하고 있고, 정의된 분무각(Spray angle,  $\theta$ )과 축방향 도달거리(Axial penetration,  $S_A$ )를 표시한다. 노즐로부터 약 50mm-70mm 구간에서 주위 기체의 도입(Entrainment)이 발생하면서 분무가 반

경방향으로 성장해 가는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 분무 선단의 연료가 주위기체에 의해 저항을 받아 점차 운동량을 잃고, 지속적으로 분사되는 연료에 의해 분무의 반경방향으로 밀려 나가면서 주위 기체와의 상호작용, 즉 도입에 의해 분무내부에 와(Vortex)유동을 형성하기 때문이다.

Fig. 3은 분사개시 후 각각 0.6ms, 1.05ms 및 1.80ms에서 디젤분무의 형상, 액적(Droplets) 및 와 구조(Vortex structure)를 연료입자의 속도분포에 의해 3D로 나타낸 그림이다. Fig. 3에서의 연료와 주위기체간의 운동량차로 인해 분무표면에서 연료가 주위기체와의 전단력에 의하여 인대(Ligament) 모양으로 가느다랗게 떨어져 나가 결국에는 액적을 형성하는 것을 자세히 관찰할 수 있다. 그리고 분무의 중심축을 따라 성장하는 연료입자는 중심축에서 분무의 반경방향으로 보다 멀리 존재하는 연료입자에 비해 주위기체유동의 영향을 적게 받기 때문에 상대적으로 분무중심축 부근 연료입자의 속도는 더



(a) Spray tip penetration



(b) Spray angle

Fig. 5 Graphs of the diesel spray tip penetration and the spray angle

높다. 실험결과에 따르면 분위기압력(밀도)의 증가와 함께 연료의 분무선단도달거리(Spray tip penetration)가 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 다음의 일반적인 항력(Drag force)식을 통해서도 알 수 있듯이 밀도( $\rho$ )가 높을수록 항력이 증가하므로 분무선단의 연료입자가 더 큰 저항을 받는다.

$$D = C_D A \frac{\rho U^2}{2} \quad (9)$$

여기서,  $D$  : 항력(N)

$C_D$  : 항력계수

$A$  : 유동방향과 수직인 방향의 투영면적( $m^2$ )

$\rho$  : 밀도( $kg/m^3$ )

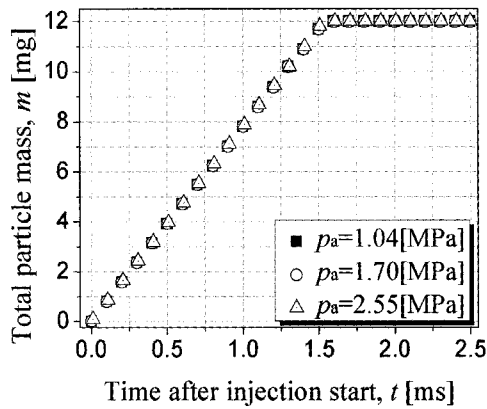
$U$  : 속도( $m/s$ )

Fig. 4는 분위기압력  $p_a=2MPa$ 과 분사압력  $p_{inj}=6MPa$  일 때, 분사개시 후 1.0ms, 5.0ms 및 10.0ms에서 천연가스분류(Jet)의 속도(Velocity)를 2-D로 나타낸

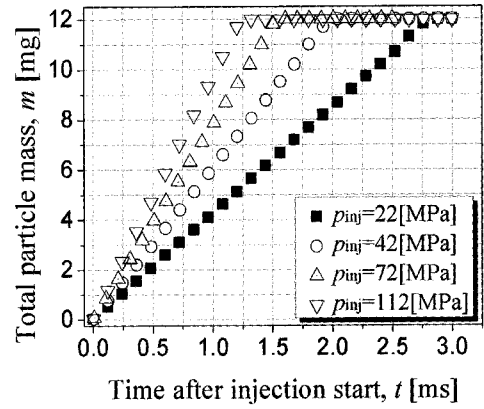
것이다. Fig. 2에서 연료와 주위기체간의 운동량 차이로 인해 와구조가 형성되고 주위기체가 디젤연료 내부로의 도입이 생기며 혼합(Mixing)이 이루어지지만 Fig. 4에서는 천연가스연료의 입자가 디젤연료의 입자보다 상대적으로 아주 작기 때문에 분사연료와 주위기체와의 혼합이 더욱 용이하다. 또한, 연료가 기체상태로 분사되어지기 때문에 액체연료의 경우에 관찰할 수 있었던 연료의 미립화(Atomization) 또는 증발(Evaporation) 현상은 존재하지 않는다.

#### 4.2 분무 및 분류의 선단도달거리 및 분무각 비교

Fig. 5 (a)는 디젤연료에 있어서 분위기압력과 분사압력을 변수로 설정하여 수치해석한 결과로서, 시간 경과(횡축, ms)에 따른 증발디젤분무의 선단도달거리(종축, mm)를 나타낸 그래프와 시간 경과(횡축, ms)에 따른 분무각(종축, degree)을 나타낸 그래프를 각각 나타낸다. Fig. 5 (b)는 위와 동일한 조건하



(a) Change in the ambient pressure



(b) Change in the injection pressure

Fig. 6 Total fuel particle mass of the diesel fuel in each case

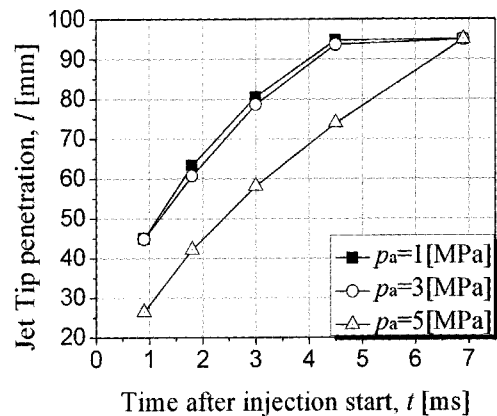
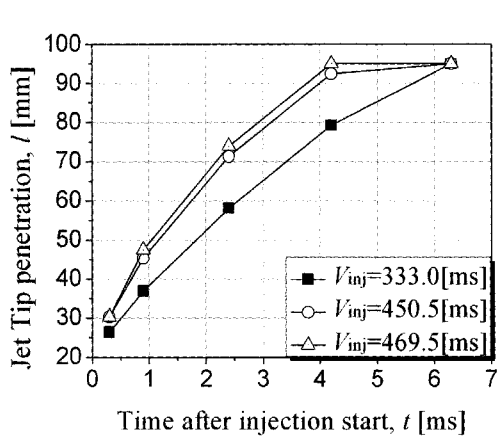


Fig. 7 Graphs of the jet tip penetration of natural gas

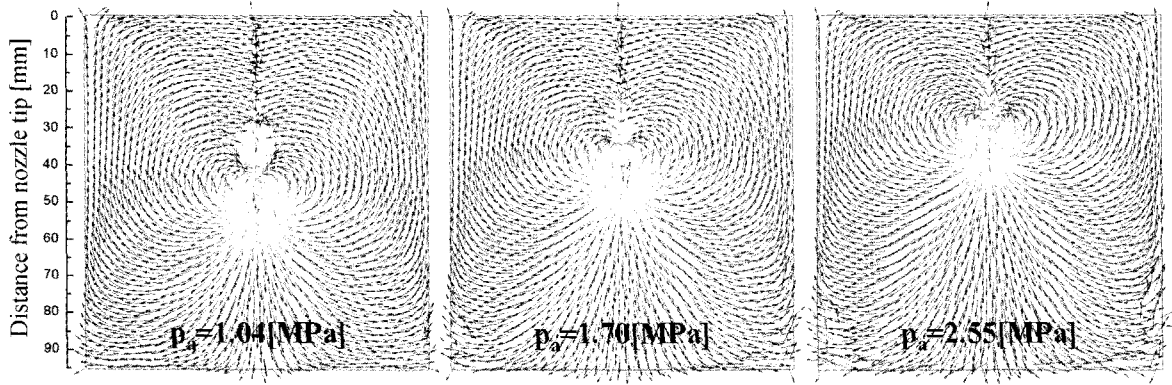


Fig. 8 Comparison of the velocity of the diesel spray at 0.50ms after start of injection with vectors normalized

에 실험<sup>13)</sup>으로 얻어진 결과이며, 시간 경과에 따른 증발디젤분무의 선단도달거리를 그래프로 나타낸다. Fig. 5 (a)와 (b)의 분무선단도달거리를 비교해 보면 정량적으로 다소 차이는 있지만, 분위기압력과 분사압력에 따른 분무선단도달거리의 변화경향은 아주 유사하다. 그리고 수치해석에 의한 결과값을 보면 실험값보다 빠른 시간에 실린더 끝까지 도달하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 실험결과분석에 있어서 가시화 실험 시 연료입자의 크기에 대한 정의가 수치해석과 다를 수 있으므로 약간의 오차가 있을 수 있다.

분무각에 대한 결과를 분석해 보면, 분사개시 이후 약 0.5ms에서 1.5ms 지점에서 분위기 압력이 높을수록 분사압력이 낮을수록 분무각은 점점 커지는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 분위기압력과 분사압력이 분무각에 큰 영향을 미친다고 볼 수 있는데 Fig. 2 2-D 분무형상과 Fig. 3 3-D 분무형상에서와 같이 연료표면의 액적들(Droplets)이 떨어져 나가면서 연료의 미립화가 이루어지는 것을 볼 수 있다. 본 수치해석에서 연료 농도분포에 따른 분무각은 비교적 농도분포가 높은 지점과 분무의 중심축에 대하여 정의하였기 때문에 Fig. 5 (a)에서 분사압력이 높을수록 약 0.5ms에서 1.5ms 지점에서 분무각이 작게 나타나는 것은 높은 분사압력의 분무선단도달거리는 길기 때문에 연료 액적들의 미립화가 보다 빠르게 이루어져 비교적 농도분포가 높은 액상의 분무반경이 줄어든다. 따라서 분무중심축과 비교적 농도분포가 높은 지점 간의 거리는 줄어든다고 판단된다. 각 그래프의 분무선단도달거리만을 비교하였을 경우, 분위기압력이 높을수록 분무선단도달거리가 짧아지고, 분사압력이 높을수록 분무선단도달거리가 길어진다. 이것은 주위변수가 주위압력

일 경우, 주위기체가 분사연료에 항력으로 작용해 분무반경방향으로 발달이 촉진되며 그 결과 대규모 와(Vortex)의 발생으로 혼합기 형성이 촉진된다고 판단된다. Fig. 6은 디젤 분무 해석에 사용한 연료의 총 분사량이다. Fig. 7은 천연가스연료에 있어서 분위기압력과 분사압력을 변수로 설정하여 수치해석한 결과이며, 시간 경과(횡축, ms)에 따른 분류선단도달거리(종축, mm)를 나타낸 그래프이다. Fig. 7의 각 조건하에서의 분류선단도달거리는 Fig. 5에서 얻은 결과와 동일하게 분위기압력이 높을수록 분무선단도달거리가 짧아지고, 분사압력이 높을수록 분무선단도달거리가 증가하는 결과를 얻었다. 천연가스와 같은 압축성유체 연료는 기체상태로 분사되기 때문에 연료의 밀도가 온도와 압력에 따라 아주 크게 변하므로 디젤과 같은 비압축성유체 연료보다 분위기압력과 분사압력에 더욱 민감하여 각 분사조건변화에 대한 수치해석 결과의 차이는 현저하다.

#### 4.3 주위 기체유동의 해석

Fig. 8은 각각의 주위기체압력  $p_a=1.04\text{MPa}$ ,  $1.70\text{MPa}$  및  $2.55\text{MPa}$ 로 변화시킨 경우에 분사개시 이후 0.50ms에서 분사된 디젤연료( $n$ -Tridecane,  $\text{C}_{13}\text{H}_{28}$ )와 주위기체(Nitrogen,  $\text{N}_2$ )의 속도벡터를 나타낸다. 분무선단을 제외하고는 표시된 속도벡터의 크기가 아주 작기 때문에 가시화를 용이하게 하기 위하여 벡터의 크기를 일정하게 설정하였다. 상류부에서 생성된 와가 분무하류방향으로 진행함에 따라 성장하여 분무반경방향의 확산유동을 지배한다. 연료분류에 의해 발생한 주위기체와 연료와의 혼합기 형성과정에서 분무 내부에 생성된 대규모의 와 속에 크고 작은 와피의 증가 때문에 주위기체압력이 증가하면 주위기체의 유동은 촉진되고, 분무

내로의 주위기체 도입(Entrainment)이 활발해진다. 그리고 주위기체압력이 클수록 연료노즐입구에 더 가깝게 분사연료와 주위기체와의 상호작용으로 인한 와구조가 형성되고 분무의 반경방향으로 확산이 증가하기 때문에 대규모 와구조의 공간적인 크기는 증가한다. 천연가스분류에 있어서의 주위 기체유동도 이와 유사하였다. 따라서 주위기체압력이 높을수록 분사연료와 주위기체의 혼합은 용이하고, 보다 균일한 혼합기형성이 기대된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고온·고압장에서 기상과 액상 연료에 대해서 범용 유동해석 프로그램을 이용하여 연료상태에 따른 분무거동특성에 관하여 연구하였다. 무공해 청정연료인 천연가스에 대한 앞으로의 실용적인 실험과 수치해석을 위하여 천연가스와 디젤연료와 같이 다른 연료상태에 있어서의 기초적 분무형태 및 거동특성을 비교·분석하였다. 그 연구 결과를 아래에 정리한다.

(1) 천연가스와 디젤연료에 대한 분류 및 분무의 거동에 있어서, 주위기체압력이 높을수록 주위기체의 항력이 커지기 때문에 분류 및 분무의 반경방향으로 보다 큰 규모의 와유동을 형성하여 균일한 혼합기형성에 유리하고 분사압력이 높을수록 분무 및 분류 내로의 주위기체 도입이 활발해져 신속하게 혼합기형성이 이루어진다.

(2) n-Tridecane( $C_{13}H_{28}$ , 액상)연료 사용 시 연료 액적들의 증발을 위한 시간이 필요하지만, Methane( $CH_4$ , 기상)연료 사용 시에는 연료분사개시부터 입자가 아주 작은 기체 상태로 분사가 이루어지기 때문에 주위기체와의 혼합기형성(Mixture formation)이 분사개시부터 이루어진다. 그 결과 상대적으로 보다 신속한 혼합기형성이 가능하다.

(3) 디젤 연료의 증발분무거동에 대한 수치해석에 있어서 Tsukasa 등<sup>4)</sup>, Ville Vuorinen 등<sup>5)</sup> 및 Tomasz G. Drozda 등<sup>6)</sup>의 연구에서와 같이 LES (Large Eddy Simulation) 방법을 적용했을 경우, 분무형상과 액적의 관찰에 있어서 이전 연구에서 적용한 비정상 RANS(Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes simulation) 보다 정확한 해석 결과를 도출할 수 있다. 그리고 천연가스분류에 대한 수치해석의 경우, 다성분모델(Multi-component model)

형태의 표준  $k-\epsilon$ 모델을 사용하면 기상연료인 천연가스의 분류 거동해석은 가능하다.

#### 후 기

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2008-331-D00085).

#### 참고 문헌

1. Yeom, J. K. and Chung, S. S., 2005, "Effect of the change in ambient gas density on the mixture formation process in evaporative free diesel spray", Trans. of the KSPSE, Vol. 9, No. 4, pp. 209~213.
2. ANSYS CFX release 11.0, ANSYS Europe, Ltd., 1996~2006.
3. Yeom, J. K. and Chung, S. S., 2005, "Effect of the change in injection pressure on the mixture formation process in evaporative free diesel spray", Trans. of the KSPSE, Vol. 9, No. 4, pp. 214~219.
4. Tsukasa, H. et al., 2008, "Effect of Convective Schemes on LES of Fuel Spray by Use of KIVALES", SAE Paper, No. 2008-01-0930.
5. Vuorinen, V. and Larmi, M., 2008, "Large-Eddy Simulation on the Effect of Droplet Size Distribution on Mixing of Passive Scalar in a Spray", SAE Paper, No. 2008-01-0933.
6. Drozda, T. G. and Oefelein, J. C., 2008, "Large Eddy Simulation of Direct Injection Processes for Hydrogen and LTC Engine Applications", SAE Paper, No. 2008-01-0939.
7. Versteeg, H. K. and Malalasekera, W., 2007, "An introduction to computational fluid dynamics", Pearson Education Ltd., pp. 98~110.
8. Senda, J., et al., H., 1997, "Spray Characteristics of Non-Reacting Diesel Fuel Spray by Experiments and Simulations with KIVA-II Code", The 7th Int. Conf. Liquid and Spray Systems(ICLASS-'97), pp. 149~156..



9. Kang, J. H., et al., 2007, "The effect of fuel injection timing on combustion and power characteristics in a DI CNG Engine", Transactions of KSAE, Vol. 15, No. 1, pp. 193 ~200.
10. Jeong, D. Y. and Lee, J. T., 2005, "A study on free spray patterns of diesel with ultra high pressure", Trans. of KSME, Vol. 13, No. 3, pp. 131 ~137.
11. Song, K. K., et al., 2005, "Effect of the injection parameters on diesel spray characteristics", KSME Int. J., Vol. 19, No. 6, pp. 1321 ~1328.