

증발디젤분무의 거동특성해석을 위한 계산기법 적용에 관한 기초 연구 Basic Study on the Application of a Computational Technique to Behavior Characteristics Analysis of the Evaporative Diesel Spray

염 정 국
J. K. Yeom

(접수일 : 2010년 7월 29일, 수정일 : 2010년 10월 14일, 채택확정 : 2010년 10월 21일)

Key Words : Ambient Pressure(주위기체압력), Evaporative Diesel Spray(증발디젤분무), Exciplex Fluorescence Method(엑시플렉스형광법), Mixture Formation(혼합기형성), Phase Change(상변화)

Abstract : In this study, an analysis of evaporative diesel spray and an usefulness of a general-purpose program, ANSYS CFX release 11.0, are investigated through the comparison and investigation of the experimental results carried out under an evaporative field, in which there is phase transition, by an exciplex fluorescence method and the results analyzed by the CFX program. The diesel fuel called n-Tridecane, C₁₃H₂₈, is injected from a single-hole nozzle ($l/d=1.0\text{mm}/0.2\text{mm}$) into a constant volume chamber under a high temperature and pressure. In the same condition as the experimental condition, the analysis was carried out. Both results of the spray tip penetration were almost coincident at each time. The results have validated the usefulness of this analysis. As a result, if the ambient pressure is high, the spray tip penetration will be shortened and move toward the nozzle exit.

1. 서 론

최근 환경오염에 대한 지대한 관심과 함께 대기 환경오염 저감을 위한 대책 마련이 절실한 가운데 자동차로부터 배출되는 오염물질을 저감시키려는 움직임이 활발히 진행되고 있다. 현재 디젤기관에 있어서는 연소제어를 통하여 유해배기가스의 저감을 시도하는 방법이 중시되고 있는 상황이다. 이것은 연료가 분사노즐로부터 분사되어진 후 그 분사된 연료증기와 주위 기체(ambient gas)와의 최적화된 혼합기형성(mixture formation)에 의해 연소제어가 가능하다. 따라서 보다 정밀한 혼합기형성 제어를 위해서는 실제 현상에 근접한 고온·고압장에서의 디젤분무 구조해석을 통한 디젤기관의 혼합기형성에 관한 연구가 매우 중요하다. 이러한 연구들에는 Yeom¹⁾, Jeong²⁾, Song³⁾ 등이 있고 Yeom¹⁾은 증발장에서 주위기체 밀도변화가 혼합기형성과정에 미치는 영향에 대해 연구하였고, Jeong²⁾은 분사

압력을 변수로 하여 극초고압 디젤분무의 분무양상에 관한 연구를 하였으며, Song³⁾은 주위 기체의 온도와 밀도가 디젤분무특성에 미치는 영향을 연구하였다. 이러한 연구들은 모두 실험연구를 통한 결과들이며, 이에 본 연구에서는 既보고한 분사연료의 상변화가 일어나는 고온·고압장에 있어서 엑시플렉스 형광법(exciplex fluorescence method)에 의해 구한 실험결과¹⁾<Appendix 참조>와 범용 유동해석 프로그램인 ANSYS CFX 11.0⁴⁾를 이용해 구한 수치해석 결과를 비교·검토하여 증발디젤분무의 거동해석과 함께 CFX 프로그램을 이용한 계산기법의 유용성에 대해서 고찰한다. 실험변수로서는 디젤분무구조에 큰 영향을 미치는 주위기체의 압력(밀도)¹⁾으로 설정하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 고온·고압 정용용기(CVC)

본 실험에 사용한 고온·고압의 정용용기(constant volume chamber; CVC)의 재질은 SS440 이고, 설계압력은 3.4MPa, 최대사용압력은 3.0MPa

염정국(교신저자) : 동아대학교 기계공학과
E-mail : laser355@dau.ac.kr, Tel : 051-200-7640

이다. 고압용기에는 레이저 시트광 입사 및 관측용 유리창(F120, t45)이 서로 직각이 되도록 설치되어 있다⁵⁾.

2.2 연료분사장치

분사장치로써 전자제어 축압식 연료분사장치[일본, Denso(주), ECD-U2 system]를 사용했다. ECD-U2는 고압 펌프, 커먼레일(Common rail), 인젝터와 이들을 제어하기 위한 ECU 및 센서들로 구성된다. 본 실험에 사용한 분사노즐은 분공경 $d=0.2\text{mm}$, 분공길이 $l=1.0\text{mm}$ (세장비 $l/d=5.0$)인 단공홀 노즐이다.

2.3 실험조건

Table 1에 본 연구에 적용된 실험의 조건¹⁾을 나타낸다. 분위기온도 $T_a=700\text{K}$, 분위기압력은 주위 기체의 밀도(ρ_a)를 5.0kg/m^3 , 8.2kg/m^3 및 12.3kg/m^3 로 설정하기 위하여 1.04MPa , 1.70MPa 및 2.55MPa 로 각각 설정했다. 분사압력 $p_{inj}=72\text{MPa}$ 에 대해서 분사기간은 1.54ms 이고, 분사연료량은 12mg 이다.

3. 수치해석방법

3.1 지배방정식

본 수치해석에 적용된 지배 방정식⁴⁾은 다음과 같다.

URANS 방정식

(Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes equation)

$$U = \bar{U} + u$$

속도(U)는 평균 성분(\bar{U})과 시간에 따라 변하는 성분(u)으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{U} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} U dt \quad (1)$$

난류유동에서 지배방정식들은 앙상블평균이 되어 진다. 따라서 최초의 수송방정식에 평균된 값들(averaged quantities)로 대체되어진 Reynolds-averaged 방정식들은 다음과 같다.

연속방정식(The Continuity Equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (2)$$

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	

여기서, p 는 압력, ρ 는 밀도이다.

운동량방정식(The Momentum Equations)

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \times U) = \nabla \cdot \tau - \overline{\rho u \times u} + S_M \quad (3)$$

여기서, $\tau(ML^{-1}T^{-2})$ 는 분자응력텐서이고, $S_M(ML^{-2}T^{-2})$ 는 운동량항(momentum source)이다. 연속방정식은 변환되어지지 않지만 운동량 방정식과 스칼라 수송방정식은 분자확산유동에 추가되는 난류유동항들을 포함한다.

레이놀즈 평균 에너지 방정식

(The Reynolds-averaged Energy Equation)

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla \tau - \rho u h) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + S_E \quad (4)$$

여기서, λ : 열전도계수(thermal conductivity)

$S_E(ML^{-1}T^{-3})$: 에너지항(energy source)

평균 총 엔탈피(enthalpy, h_{tot})는

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2 + k \quad (5)$$

이고, 운동에너지(kinetic energy, k)는 다음과 같다.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u^2} \quad (6)$$

따라서, 변수들이 추가된 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho U \phi) = \nabla \cdot (I \nabla \phi - \rho u \phi) + S_\phi \quad (7)$$

본 연구에서 난류모델(turbulence model)은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 또한, 다상모델

(multiphase model)중에서 입자전달이론(particle transport theory)을 적용하고, Lagrange적 관점에서의 유동에 의한 연료분사입자궤도를 추적하였다(Lagrangian particle tracking).

3.2 Reitz & Diwakar 분열 모델

본 해석에 적용된 분열 모델은 Reitz and Diwakar 분열 모델이다. 이 모델은 Bag분열 형태와 Stripping 분열 형태를 구별하며, 임계입자의 웨버수가 초과되면 분열이 발생한다.

Bag 분열

$$(We > We_{crit}): t_{br} = C_1 \sqrt{\frac{\rho_F r^3}{2\sigma}}, r_{stable} = \frac{6\sigma}{\rho_F V_{slip}^2} \quad (8)$$

Stripping 분열

$$\left(\frac{We}{\sqrt{Re}} > C_{s1}\right): t_{br} = C_2 \frac{r}{V_{slip}} \sqrt{\frac{\rho_F}{\rho_P}}, \quad (9)$$

$$r_{stable} = \frac{\sigma^2}{2\rho_F^2 V_{slip}^3 v}$$

여기서, C_1 (time factor for Bag breakup) : π

C_2 (time factor for Stripping) : 20

We_{crit} (critical Weber number for Bag):6.0

C_{s1} (Weber number factor for Stripping):0.5

t_{br} : 분열시간(characteristic breakup time)

r_{stable} :액적반지름(radius for the stable droplet)

v : 비체적(specific volume) 이다.

3.3 해석조건

Table 2 Computational conditions (for CFX 11.0)

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 pressure	p_a [MPa]	1.04, 1.70, 2.55
Ambient gas		N ₂ gas
Fuel		n-Tridecane
Injection velocity	V_{inj} [m/s]	357.6
Injection pressure	p_{inj} [MPa]	72
Injection quantity	Q_{inj} [mg]	12.0
Injection duration	t_{inj} [ms]	1.54
Total number of elements of mesh		60901
Total number of nodes of mesh		17686

Table 2에 본 해석의 조건을 나타낸다. 상기의 실험 조건과 동일하게 하였으며, 분사압력 $p_{inj}=72\text{MPa}$ 을 분사속도 $V_{inj}=357.6\text{m/s}$ 로 환산하여 해석하였다. Fig. 1은 본 해석에 사용된 격자구조를 나타낸다.

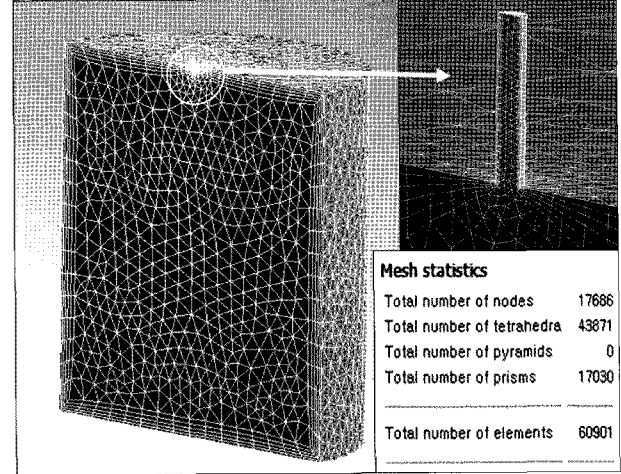


Fig. 1 Mesh structure⁶⁾

4. 결과 및 고찰

4.1 자유분무의 거시적 연구 결과

Figs. 2-(a), (b) 및 (c)는 분사속도 $V_{inj}=357.6\text{m/s}$ 에서 각각의 주위기체압력을 변화시킨 경우에 시간에 따른 n-Tridecane($C_{13}H_{28}$)의 부피분율(volume fraction)을 나타낸다. 각 그림은 시간 $t=0.2, 0.4, 0.75, 1.1$ 및 1.75ms 일 때의 형상을 나타낸다. 실험 결과에 따르면 주위기체밀도(압력)의 증가와 함께 분무의 선단도달거리가 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 실험결과¹⁾와 잘 일치 하는 것이다.

$$D = C_D A \frac{\rho U^2}{2} \quad (10)$$

여기서, D 는 항력, C_D 는 항력계수(drag coefficient), A 는 유동방향과 수직한 평면으로의 물체의 투영면적, ρ 는 밀도 및 U 는 속도를 각각 나타낸다. 위의 식에서 알 수 있는 주위기체의 항력에 의해 저항을 받는 분무선단의 연료는 점차 운동량을 잃고, 계속해 분사되는 큰 운동량을 가진 연료에 의해 분무의 반경방향으로 밀려 나가며 성장하게 된다. 그 결과 주위기체의밀도가 높고 저항이 클수록 분무 반경반향으로 확산(폭)이 크게 된다.

4.2 증발디젤분무의 거시적고찰 (분무선단도달 거리 비교)

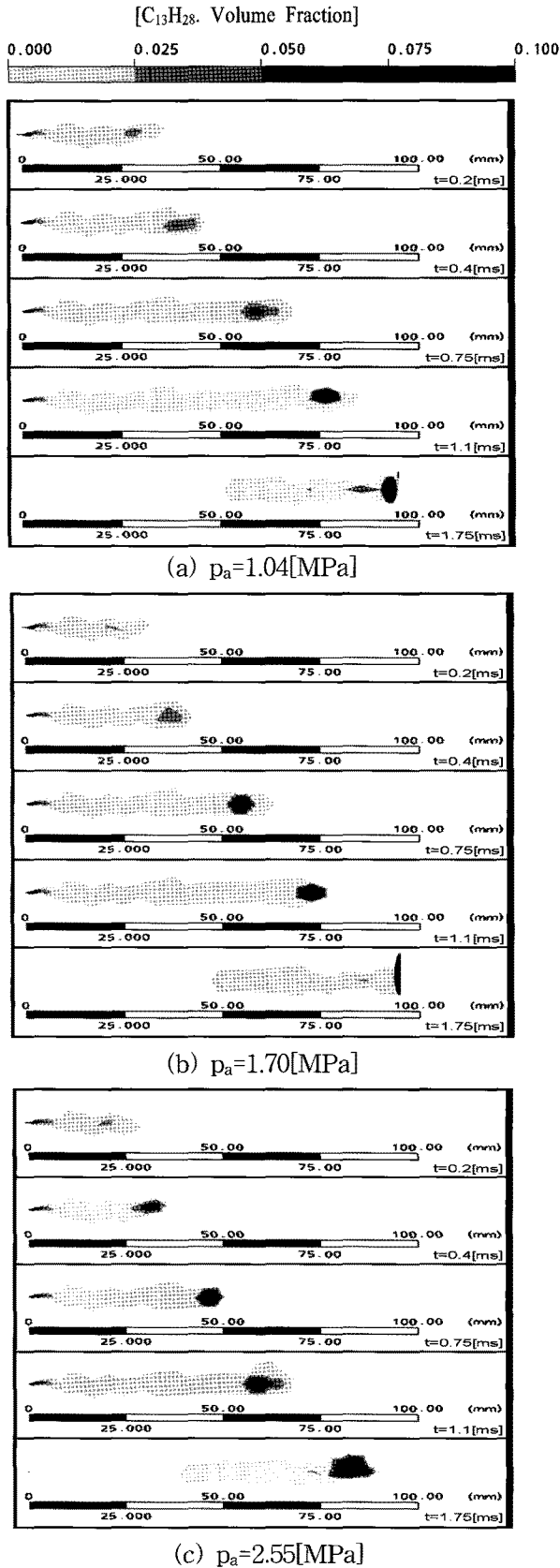
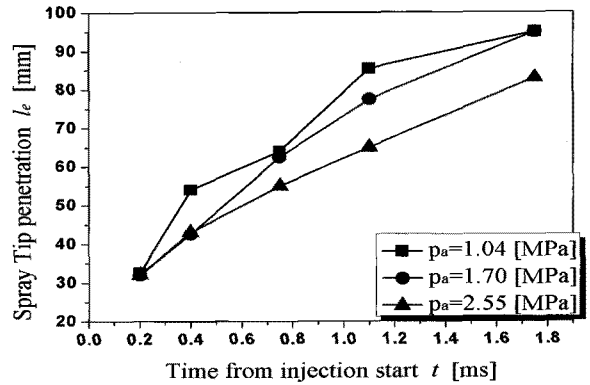
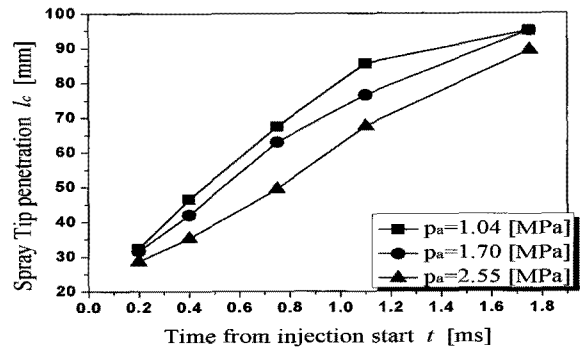


Fig. 2 Temporal change in the diesel spray at $V_{inj}=357.6[m/s]$

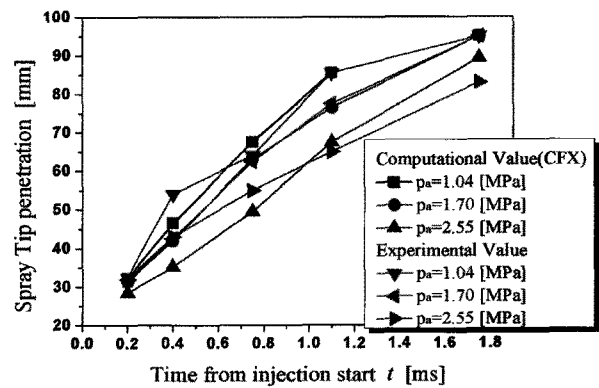
Fig. 3-(a)는 실험을 통한 시간 경과(횡축, ms)에 따른 증발디젤분무의 선단도달거리(종축, mm)를 그래프로 나타내고, (b)는 (a)와 같은 시간 경과에



(a) Penetration l_c from the experiment



(b) Penetration l_c from CFX



(c) Comparison of the computational and experimental values

Fig. 3 Temporal change in the penetration of the computational and experimental values

따른 수치해석적 분무선단도달거리를 나타낸다. Fig. 3-(c)는 (a)와 (b)를 비교한 그래프이다. Fig. 3을 보면 시간 경과에 따른 분무선단도달거리가 $t=0.4ms$ 에서의 실험결과와 수치해석결과가 약0.5~8.0mm정도의 차이를 보이고 있지만, 그 외 시간경

과에 따라서는 동일한 결과를 보인다. 따라서 증발 디젤분무의 거동해석을 위한 수치기법으로서 범용 유동해석 프로그램인 ANSYS CFX 11.0의 적용은 타당하다고 판단된다.

Fig. 4에는 주위기체의 압력(밀도) 변화에 대한 분무각의 측정결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 비록 차이는 미미하나 주위기체의 압력(밀도)이 높을수록 분무선단부에서 발생하는 주

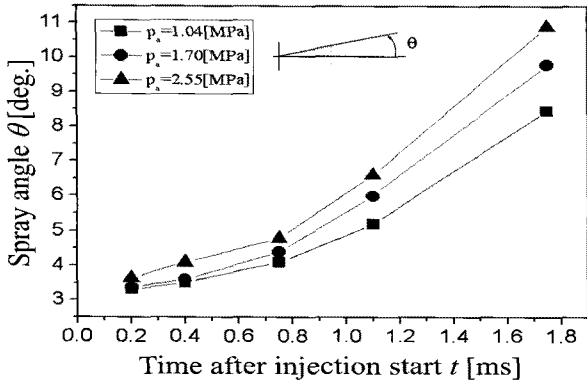


Fig. 4 Temporal change in spray angle for ambient pressure

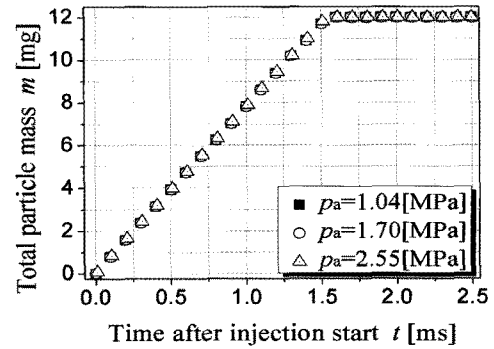


Fig. 5 Total particle mass of the diesel fuel in the change of the ambient pressure

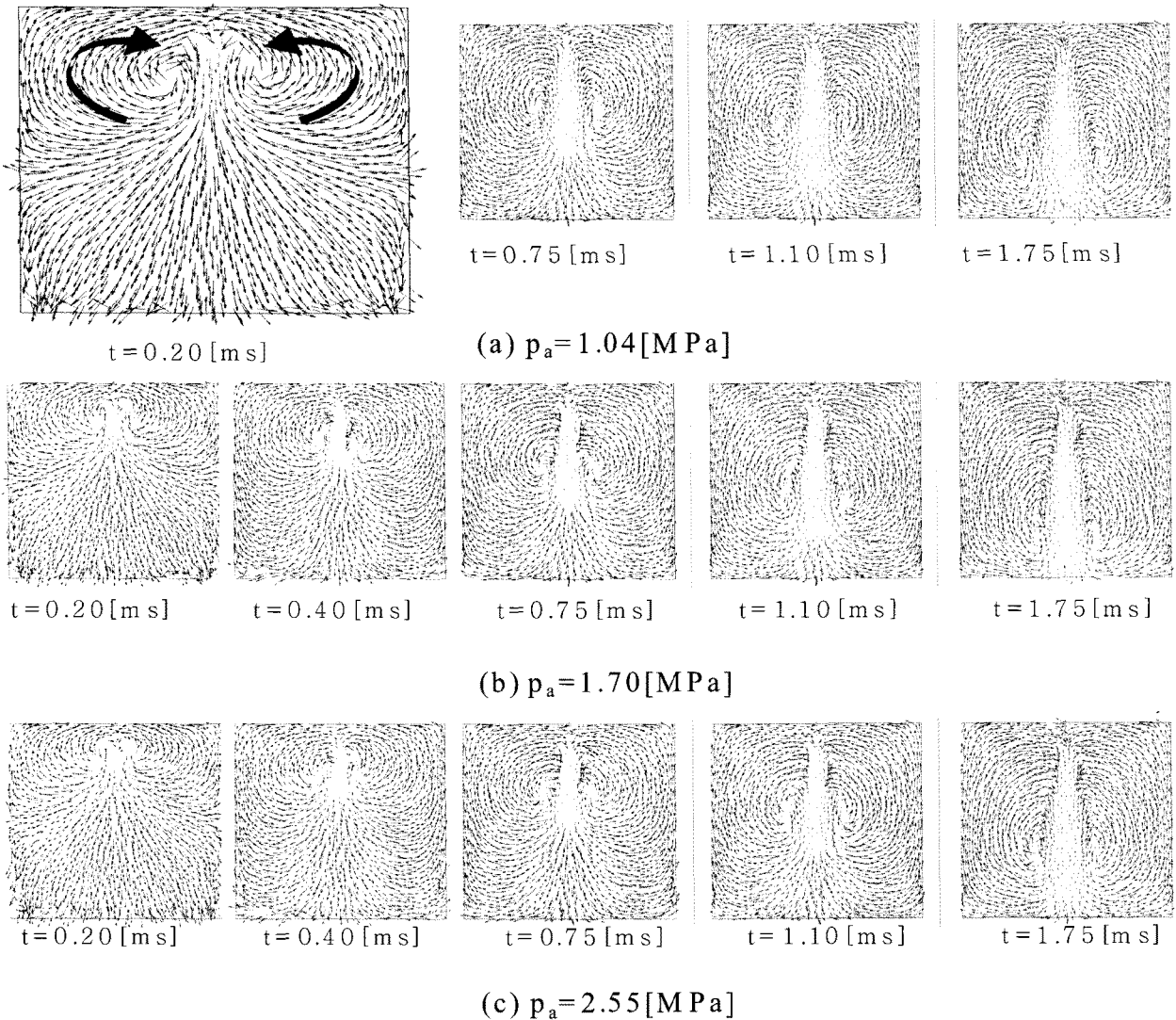


Fig. 6 Temporal change in the velocity of the diesel spray at each ambient pressure with vectors normalized symbols

위기체에 의한 항력의 증가로 분무 축방향에 비하여 분무 반경방향으로의 성장이 지배적으로 되는 경향을 볼 수 있다. 그리고 Fig. 5는 각 시간에 있어서 분사량의 변화량을 참고로 보인다.

4.3 주위 기체유동의 해석

Fig. 6은 주위기체압력을 $p_a=1.04\text{MPa}$, 1.70MPa 및 2.55MPa 로 각각 변화시킨 경우의 시간에 따른 분사된 연료와 주위기체의 속도벡터를 나타낸다. 그림 속의 하늘색 벡터들이 분무를 나타내며, 푸른색 벡터들은 주위기체의 속도벡터를 나타낸다. 벡터의 크기가 작기 때문에 $p_a=1.04\text{MPa}$ 일 때 $t=0.20\text{ms}$ 인 경우를 확대하여 나타내었다. Fig. 3의 결과와 동일하게 주위기체의 밀도가 높을수록 동일한 시간에 있어서 분무의 선단도달거리는 감소함을 알 수 있으나, 주위기체의 유동의 뚜렷한 차이는 확인할 수 없다. 그러나 주위기체가 분무중심축을 중심으로 양방향으로 나뉘어 분무선단을 향하여 유동하는 전형적인 거시적 분무거동은 확인할 수 있다. 이것은 상류부에서 생성된 와(vortex)가 분무하류방향으로 진행함에 따라 성장하여 분무반경방향의 확산유동을 지배함을 나타낸다. 또한 연료분무 유동에 의해 발생한 주위기체와 연료와의 혼합기형성 과정에 있어서 분무 내부에 생성된 대규모의 와속에 크고 작은 와괴(渦塊)의 증가 때문에 주위기체 밀도(압력)가 증가하면 주위기체의 유동은 촉진되고, 분무 내로의 주위기체 도입(entrainment)이 활발해진다¹⁾. 이와 같은 수치해석의 결과를 종합해보면 증발디젤분무의 거동특성해석을 위한 수치해석기법으로서의 유동해석 프로그램인 ANSYS CFX의 활용은 타당하다고 판단되나, 보다 정도 높은 분무유동해석을 위해서는 앞으로 분열 및 액적의 열전도를 고려한 부프로그램(sub-program) 등의 개선이 반드시 필요하다.

4.4 분무 거동특성해석을 위한 계산기법의 응용

현재는 전술한 결과를 바탕으로 연료를 디젤의 대표성분인 n-Tridecane에서 CNG(CH_4)로 변경하여 보다 정량적인 계산(그림중의 우측 범례참조)을 진행 중이며, 그 결과의 일례를 Figs. 7~8에 나타낸다. 이러한 연구결과를 기초로 범용 유동해석 프로그램인 CFX를 연구목적에 적합하게 지속적인 수정 및 개선작업을 수행한다면 최근 활발히 진행 중인 바이오디젤연료(bio-diesel fuel)에 대한 분무 거동특성 연구에도 충분히 응용 가능할 뿐만 아니

라 그 활용 분야는 광범위 할 것으로 판단된다.

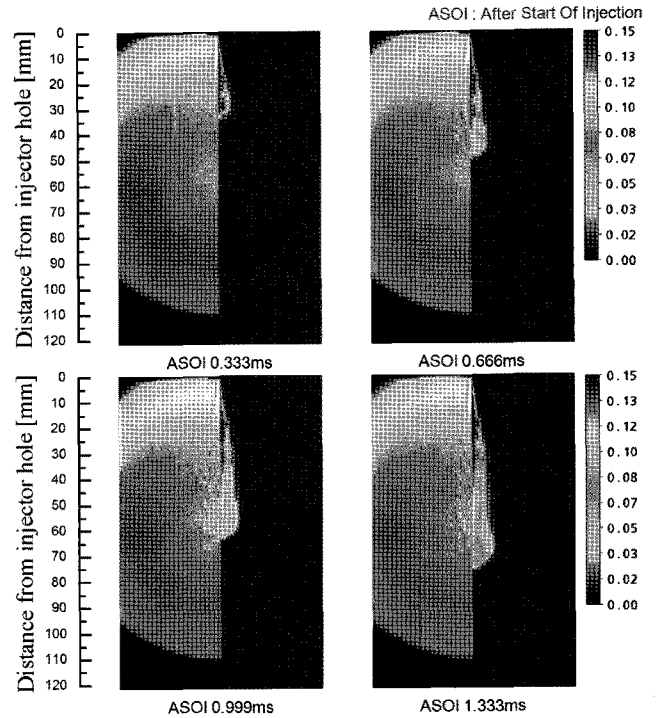


Fig. 7 Comparison of the CNG images and the numerical results colored by CH_4 mass fraction at the injection pressure of 2[MPa]

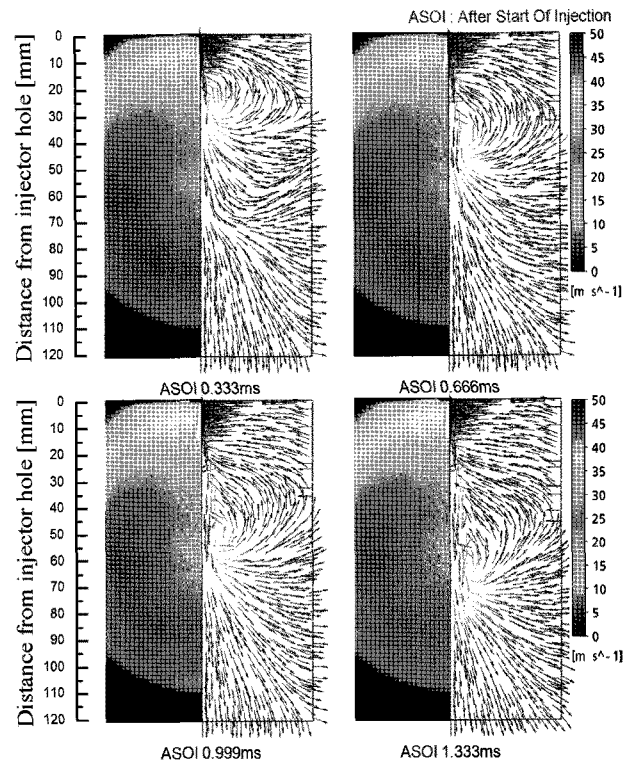


Fig. 8 Comparison of the CNG images and the numerical results with vectors expressed by velocity at the injection pressure of 2[MPa]

5. 결 론

본 연구에서는 분사연료의 상변화가 일어나는 고온·고압장에 있어서 실험결과와 범용 유동해석 프로그램을 이용해 구한 수치해석 결과를 비교·검토하였다. 그 결과 증발디젤분무의 거동해석에 위한 범용 유동해석 프로그램(CFX)의 유용성을 확인할 수 있었고, 그 연구결과를 아래와 같이 정리한다.

(1) ANSYS CFX 범용 유동해석 프로그램을 이용하여 주위조건에 따른 분무선단도달 거리 등 거시적인 디젤분무의 거동특성 해석은 가능하였고, 보다 정확하고 실제현상에 근접한 정량적 해석을 위해서는 액적증발의 열전달과정 및 액적 분열과정을 위한 프로그램의 개선은 필요하다.

(2) 증발장에 있어서 CFX를 이용한 수치해석의 결과도 실험결과와 같이 주위기체밀도(압력)가 높을수록 주위기체의 항력 증가 때문에 분무의 선단도달거리는 감소한다. 따라서 주위기체밀도가 높은 경우가분무반경방향으로 보다 큰 분무 내 대규모의 와유동을 형성하기 때문에 주위기체밀도(압력)가 높을수록 균일하고 신속한 혼합기형성에 유리하다.

(3) 분무선단도달거리의 고찰에 있어 분사초기 약 $t=0.4\text{ms}$ 에서 실험결과와 해석결과 사이에 약 $0.5\sim 8\text{mm}$ 정도의 차이는 실제분무의 경우, 노즐입구에서 분무초기 거동은 액상(liquid phase)이 지배적이기 때문에 주위의 영향, 즉 주위기체밀도(압력)에 민감하지 않다. 반면에 수치해석의 경우, 초기분무의 형태는 액적(droplets)으로 가정하여 해석하기 때문에 주위기체밀도(압력)의 영향이 실제분무의 경우보다 더욱 크기 때문이라고 판단된다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0003037).

참고문헌

1. J. K. Yeom and S. S. Chung, 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. D. Y. Jeong and J. T. Lee, 2005, "A study on free spray patterns of diesel with ultra high pressure," *Trans. of the KSME*, Vol. 13, No. 3, pp. 131~137.

3. K. K. Song, S. C. Sim, B. K. Jung, H. G. Kim and J. H. Kim, 2005, "Effect of the injection parameters on diesel spray characteristics," *KSME Int. J.*, Vol. 19, No. 6, pp. 1321~1328.

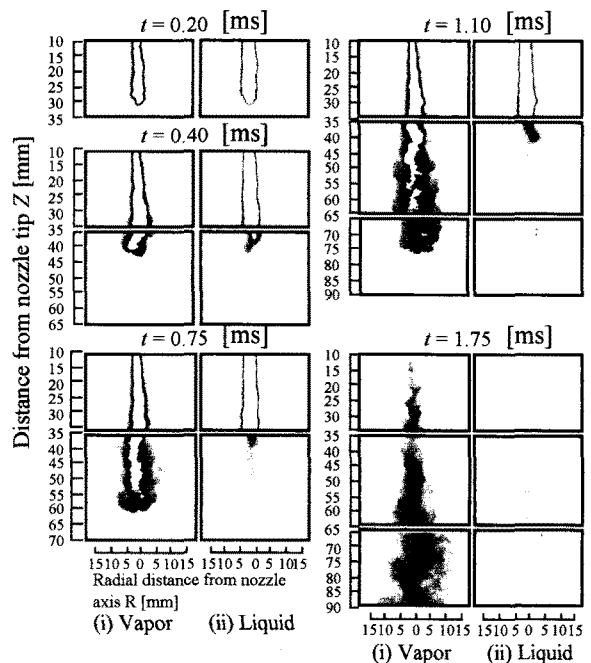
4. ANSYS CFX release 11.0, 1996~2006, ANSYS Europe, Ltd.

5. J. K. Yeom, 2010, "An experimental analysis on the behavior characteristics of evaporative impinging spray," *Trans. of the KSPSE*, Vol. 14, No. 2, pp. 16~21.

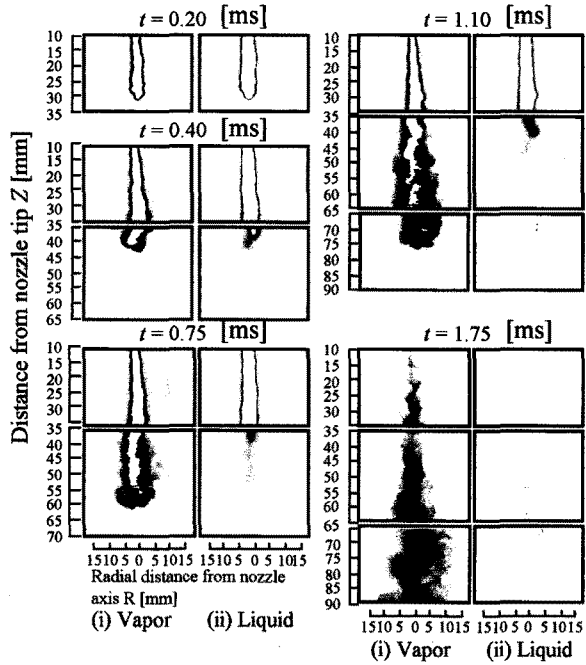
6. M. C. Kim, S. S. Chung, J. Y. Ha and J. K. Yeom, 2008, "Study on the behavior characteristics of evaporative diesel spray using CFX", *Proc. of KSME(spring)*, pp. 192~198.

<Appendix>

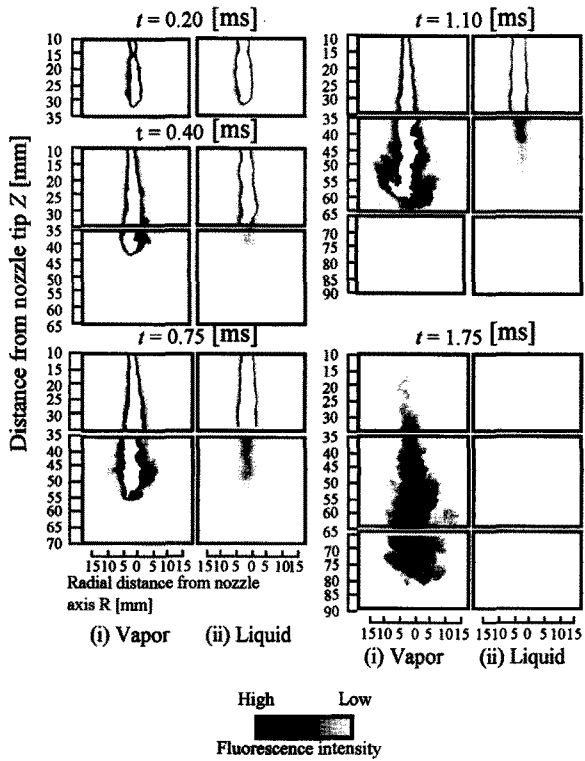
- An Analysis on the Effect of the Density Change in Ambient Gas on the Mixture Formation Process in Evaporating Diesel Spray¹⁾-



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



(b) $r_a = 8.2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, $p_a = 1.70 \text{ [MPa]}$



(c) $r_a = 12.3 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, $p_a = 2.55 \text{ [MPa]}$

Fig. A Temporal change in diesel spray with exciplex fluorescence method at $p_{inj}=72\text{[MPa]}$