

모형 램젯 연소기에서 액체제트의 다상유동 해석

오정석[†] · 이원남* · 이종근** · Dominique A. Santavicca**

Multiphase Simulation of a Liquid Jet in a Lab-scale Ramjet Combustor

Jeongseog Oh[†] · Wonnam Lee* · Jonggeun Lee** · Dominique A. Santavicca**

ABSTRACT

The multiphase simulation of a liquid jet in a lab-scale ramjet combustor with a plain orifice type injector was studied with a commercial CFD tool, a FLUENT program. The objectives of the current study are to analysis the breakup characteristics of a hexane liquid jet in a cross flow and to derive the correlation between flow conditions and drag force coefficients in a test section. From the result of a numerical simulation, we concluded that a DPM and Realizable k- ϵ model with an enhanced wall treatment were available to simulate the multiphase flow simulation. And the calculated distribution of a hexane vapor concentration was well-matched with experimental results.

초 록

상용 전산유체해석 프로그램을 사용하여 오리피스형 분사기에서 수직분사 액체 제트의 다상유동을 해석하였다. 본 연구의 목적은 오리피스형 분사기 분무 특성을 이해하고 연소기 내부 위치에 따른 유동조건과 항력계수와와의 관계식을 구하는 것이다. 수치해석 결과 모형 램젯 연소기에서 수직분사 유동해석은 난류점성모델인 Realizable k- ϵ 모델과 다상유동모델인 DPM 모델이 유효함을 확인하였다. 또한 오리피스형 분사기에서 레이저 흡수법을 사용하여 측정된 실험결과(증기농도분포)는 수치해석 결과와 잘 일치하였다.

Key Words: Plain orifice type injector(오리피스형 분사기), Hexane vapor concentration(헥산 증기농도), SMD(평균액적크기), DPM model(다상유동 해석 모델), Drag coefficient(항력계수)

1. 서 론

[†] 오정석, 회원, (주)현대로템 기술연구소
연락처, E-mail: jeongs5@snu.ac.kr

* 단국대학교 기계공학과

** 펜실베이니아 주립대학교 기계원자력공학과

일반적으로 오리피스형 분사기(a plain orifice type injector)는 단순한 구조로 인하여 액적분열 기구 및 분무모델 개발에 이용되고 있다. 실용적으로 한 수직 분사방식은 액체연료의 저장성과 높은 에너지 밀도로 인해 램젯 또는 항공용 가

Table 1 Numerical scheme; physical model(top) and solution method(bottom).

Physical model	Viscosity	Realizable k-ε model	Enhanced wall treatment
	Species	Species transport model	Finite rate eddy dissipation
	Discrete phase	Interaction with continuous phase	Unsteady particle tracking
Solution method	Pressure-Velocity coupling	Scheme	Implicit
	Spatial discretization	Gradient	Least squares cell based
		Flow	2nd order upwind
		Turbulent kinetic energy	2nd order upwind
		Turbulent dissipation rate	2nd order upwind

스터빈에서 추력을 얻기 위해 폭넓게 사용되고 있다 [1~3]. 그러나 액체연료의 연소는 특성시간에 따라 액주 및 액적분열(breakup), 미립화(atomization), 기화(vaporization), 혼합(mixing), 대류(convection), 화학반응(chemical reaction)으로 나누어진다. 기체연소에 비하여 외부의 교란에 영향을 받기 쉽고 제어하기가 어려우므로 분무 특성 및 이를 예측하기 위한 연구가 이루어지고 있다 [3~5].

액체분열기구는 대상의 형상에 따라 액적(droplet), 액주(liquid column), 액면(liquid sheet)으로 구분할 수 있다. 액적분열은 액적의 표면장력(surface tension)과 중력(gravity)의 상호작용으로 이루어진다. 액주의 경우 액적의 표면장력과 중력뿐만 아니라 분사되는 관성력(inertial force)과 주위공기와 상대속도차로 나타나는 동압(dynamic pressure) 및 유체의 점성(viscosity)에 영향을 받는다. 중력장내에서는 내재적 불안정(intrinsic instability)으로 인하여 액주에 압력이 균일하게 작용하지 않으므로 이로 인한 출렁임(wave)이 발생하고 액적형성에 영향을 미친다. 이는 분사기 출구 형상과도 관련이 있으므로 유동 조건과 함께 액적 크기를 결정짓는 요인이 된다. 이를 모사한 선형 이론에 따르면 액적(primary droplet) 크기(dpri)는 오리피스형 분사기 출구직경(dout)의 배수로 예측할 수 있다 [6]. 그러나 비선형적인 요소(secondary droplet, ligament)들이 발생하므로 분열 모델을 개선하기 위한 연구가 진행되고 있다 [7].

본 연구에서는 전산유체해석(CFD; computational fluid dynamics) 기법을 이용하여 오리피

스형 분사기의 분무특성을 분석하고 유동조건과 항력계수와의 관계식을 구하고자 한다. 연구목적은 실험적으로 구한 수치분사제트의 핵산증기분포 결과를 잘 모사하는 수치해석 기법을 확보하는 것이다. 이를 바탕으로 실험적으로 획득하기 어려운 액적크기분포를 예측하고 유동조건과 항력계수와의 관계식을 유도하고자 한다.

2. 해석방법

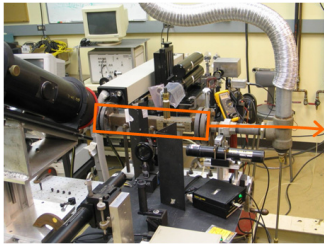
2.1 이론적 배경

유동장 수치해석을 위하여 범용 유동해석 프로그램인 FLUENT를 사용하였다. 액체 핵산이 모형 램젯 연소기 내부에서 증발하는 현상을 모사하기 위하여 다상유동 모델인 DPM(Discrete Phase Model) 기법을 사용하였다. 이때 방정식은 내삽법(implicit)으로 계산하였다. 액체의 수치분사제트(a liquid jet in a cross flow)를 모사하기 위한 3차원 비정상 유동장의 지배방정식은 아래의 식(1)과 같이 미분면적(dA)과 임의의 검사체적(V)에 대한 Cartesian 적분형태의 Navier-Stokes 방정식으로 표현된다 [8].

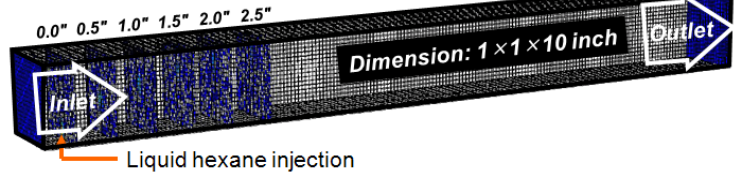
$$\frac{d}{dt} \int_V \bar{W} dV + \oint (\bar{F} - \bar{G}) dA = \int_V \bar{H} dV \quad (1)$$

여기서 \bar{W} 는 유동변수, \bar{F} 는 대류항, \bar{G} 는 점성항, \bar{H} 는 체적력과 에너지 소스항을 나타낸다.

점성에 의한 연소기 내부의 3차원 난류유동을 모사하기 위하여 Realizable k-ε 모델을 사용하



(a)



(b)

Fig. 1 (1) side view of a experimental setup, (b) computational domain and mesh adaptation.

였다. 벽면 근처에서의 경계층 효과를 고려하여 enhanced wall function을 사용하였다. 본 해석에서 사용된 방정식들을 계산하기 위한 이산화(discretization) 기법들을 Table 1에 정리하였다.

2.2 해석조건

본 연구에서는 선행연구를 통하여 실험적으로 구한 핵산증기농도 분포를 수치해석 결과와 비교하여 해석 모델의 유효성을 검증하였다 [3]. 이후 연소기 위치별로 액적분포를 구하여 대표적인 액적인 직경 45 μm 의 액적 궤적과 비교하였다.

초기분사조건은 상온상압조건(20°C, 1 atm)에서 공기속도(u_A) 55.5 m/s와 연료분사속도(u_F) 15.5 m/s로 하였다. 실험 장치와 유동조건을 각각 Fig. 1과 Table 2에 정리하였다.

핵산의 수직분사제트 다상유동 해석을 위한 계산영역과 격자를 Fig. 2에 나타내었다. 정렬격자(structured grid)를 사용하였고 격자수는 약 8 단계로 하였다.

Table 2 Test condition

Variables	Range	
Temperature (°C)	20	
Measured location (inch)	0.0~2.5 (with 0.5" step to downstream)	
Fuel to air momentum ratio (Q_F/A)	40	$u_A=55.5$ m/s $u_F=15.5$ m/s
Fuel property	$\rho_{air}=1.205$, $\rho_{Hexane}=659$ (at 20°C, 1 atm) Hexanes (85% n-Hexane + 15% Hexane isomers)	

3. 해석결과

3.1 수직분사 유동장 해석

액체 핵산의 수직분사 특성을 이해하기 위하여 test section 내부의 유동장과 농도장을 해석하여 분석하였다.

Figure 2는 상온상압에서 직경(d) 0.0102 inch인 오리피스형 분사기로 액체 핵산을 분사하였을 때의 해석결과를 가시화한 사진이다. 분사시간은 10 초로 하였고 이때의 액체 핵산 농도장과 기화율, 액적의 수밀도 및 기상 핵산의 질량분율 분포를 Fig. 2 (a)~(d)에 나타내었다. Figure 2 (a)에서 보듯 수직 분사된 핵산은 후류로 갈수록 test section 윗면에 근접하고 있다. Fig. 2 (b)는 기화율분포를 나타내고 있는데 수직분사 직후 액체 핵산은 주위의 열원으로 인해 급격히 기화됨을 알 수 있다. 기화율(Fig. 2 (b))을 액상 핵산 궤적(Fig. 2 (a))와 비교해 보았을 때 액주(liquid column) 뒤쪽과 주액적(primary droplet) 아래쪽에 분포하는 것을 알 수 있다. Figure 2 (c)에서의 액적 수밀도 분포를 참고해 볼 때 기화율은 액주와 주액적의 표면에서 뿐만 아니라 이들에게서 떨어져 나온 ligament와 이차액적(secondary droplet, satellite) 등에 의해 영향 받음을 알 수 있다.

Figure 2 (d)는 기화된 핵산의 질량분율 분포를 나타낸 그림이다. 기상 핵산의 농도는 분무궤적을 따라 분포하였고 최대강도의 위치는 분사 초기에 증가하다가 후류로 갈수록 그 높이가 일정해졌다. 또한 핵산 증기 농도 값은 후류로 갈수록 누적되어 증가하였다.

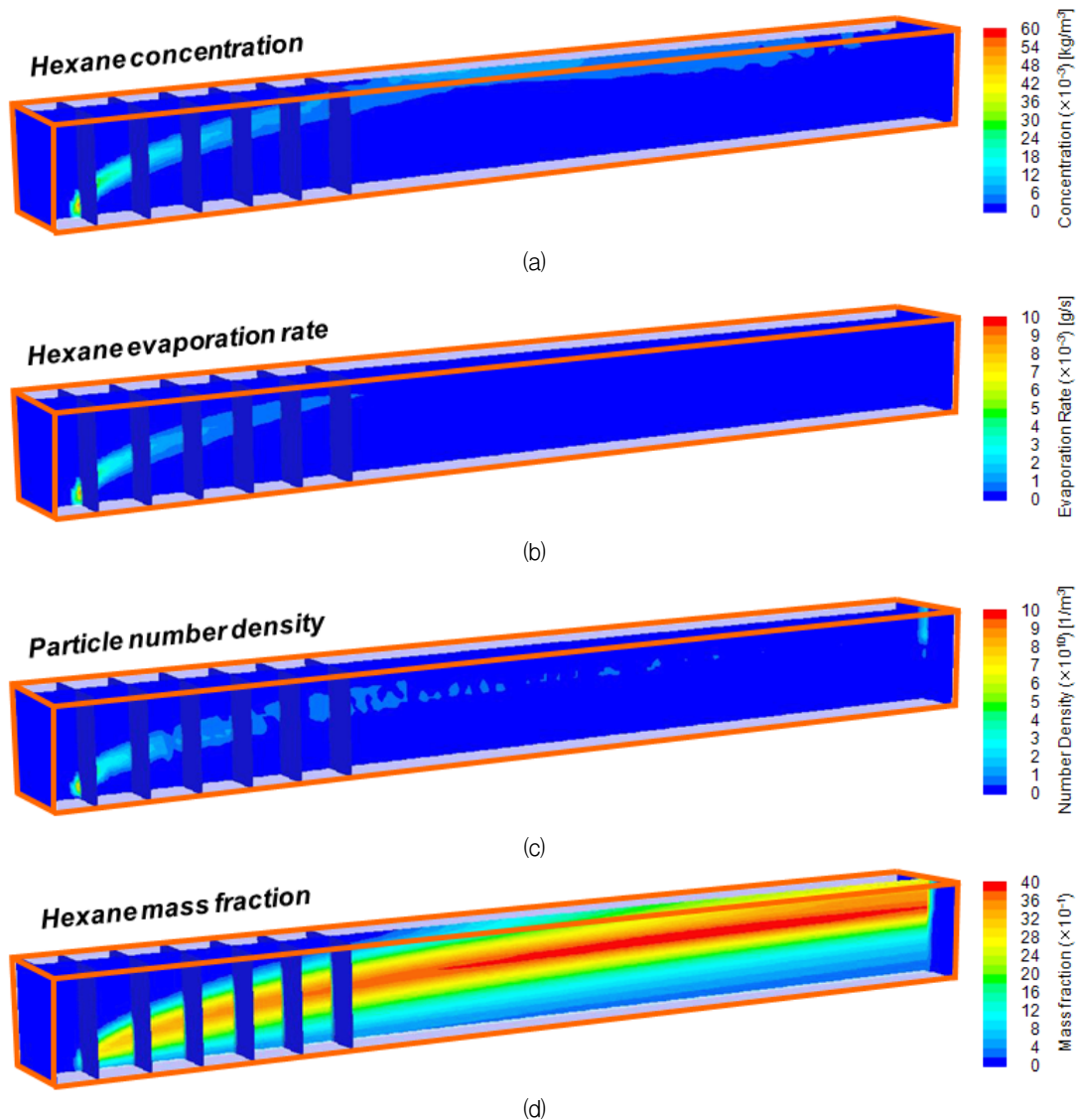


Fig. 2 Simulation results shows a internal flow field in a test section; (a) liquid hexane concentration, (b) hexane evaporation rate, (c) number density of hexane droplets, and (d) mass fraction of hexane gas.

액체 연료의 분무는 연소를 위한 선행단계이므로 실용적인 관점에서 Fig. 2의 액상과 기상 핵산 분포는 보염기(flame holder) 위치를 결정하는데 있어 참고자료로 활용할 수 있다. 보염기 위치는 통상 액적이 모두 기화하고 유동장 및 농도장이 일정해지는 지점으로 결정하나 연소시 열전달 특성과 연소불안정 현상 저감을 고려하여 정하기도 한다. 본 연구에서 사용되는 test

section과 같은 직육면체 형태의 덕트 내부에서는 화염을 안정화하기 위하여 V형 보염기(V gutter)를 사용하기도 한다. 연료와 산화제 혼합기가 V형 보염기를 지나면서 재순환 영역(recirculation zone)을 형성하고 이로 인해 유동속도보다 화학반응속도가 빠라지므로 화염밑단(flame base)이 안정적으로 안착하게 된다. 이때의 화염구조는 에지화염(edge flame) 형태를 지

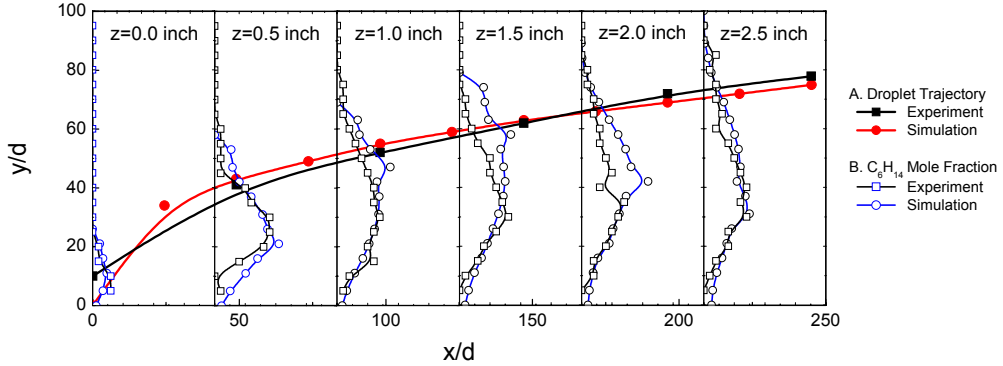


Fig. 3 Comparison between experimental and numerical results, which shows the droplet trajectories and the distribution of vaporized hexane gas mole fraction at each cross section from $z=0.0$ inch to 2.5 inch with a 0.5 step.

니고 일반적으로 예지화염의 화염전파속도는 연료-공기 혼합기의 농도구배(the gradient of mixture concentration)와 국소 신장(local stretch; strain rate, curvature)에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다 [9].

3.2 액적 궤적 및 증기농도분포

Figure 3은 Fig. 2 (d)에서의 기상 헥산농도 분포를 분사기 위치에서 후류(downstream)로 2.5 인치까지 0.5 인치 간격으로 각 단면별로 정성적으로 구한 그림이다. 이를 선행연구에서 레이저 흡수법을 이용하여 정량적으로 측정한 실험값과 비교하였다 [3,10,11]. 그리고 실험 및 해석적으로 구한 액적 궤적과도 비교하여 분사특성과 증발특성을 함께 나타내었다. 선행연구에서 구한 액적궤적 실험식은 아래의 Eq. 1과 같다 [12].

$$\frac{y}{d} = 3.127 \times q^{0.425} \times \left(\frac{x}{d}\right)^{0.346} \quad (1)$$

여기서 y 는 분사방향이고 x 는 모형 연소기 입구로 들어오는 공기흐름방향으로 분사방향(y)에 수직인 성분이다. 이를 오리피스형 분사기 직경(d)으로 무차원화 하였다. q 는 헥산과 공기의 운동

량비로 아래의 Eq. 2와 같다.

$$q_{F/A} = (\rho_F \times u_F^2) / (\rho_A \times u_A^2) \quad (2)$$

여기서 u_F 와 u_A 는 각각 test section 입구와 오리피스 출구에서의 평균속도이고 $\rho_F(=659 \text{ kg/m}^3)$ 와 $\rho_A(=1.205 \text{ kg/m}^3)$ 는 상온상압에서 헥산과 공기의 밀도이다.

Figure 3에서 보듯 액적궤적과 실험값과 해석값은 거의 유사한 경향과 분포를 나타내었다. 액적궤적 실험값은 레이저 흡수법을 사용하여 각 단면에서 최대강도를 연결한 곡선이므로 개별 액적의 질량이 클수록 높은 값을 가진다. 이는 수치해석에서 액상 헥산 농도장의 최대값과 물리적으로 같은 의미를 지닌다. 그러나 가지적으로 보이는 액적의 궤적과 달리 농도장은 액적 궤적 아래에 형성됨을 확인할 수 있다. 앞 단락 (3.1)에서 언급한 바와 같이 액주와 주액적에서 분열된 이차액적들이 농도장 형성에 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다. 이는 상대적으로 질량대 면적비가 큰 작은 직경의 액적들이 증발에 유리하기 때문이다. Figure 2 (b)에서의 증발률 분포가 이를 뒷받침 한다.

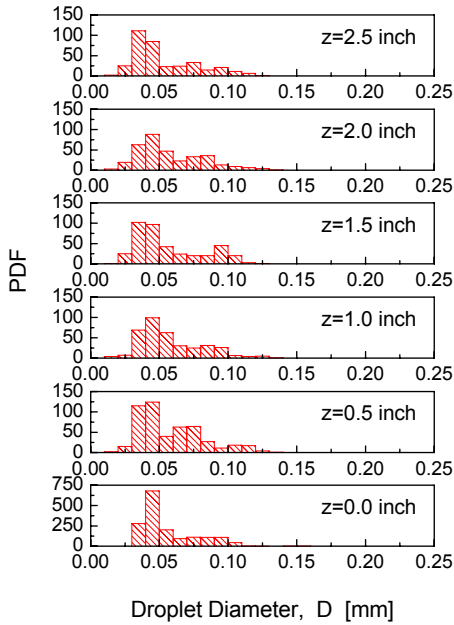


Fig. 4 The histogram of droplet size distribution at each cross section from $z=0.0$ inch to 2.5 inch with a 0.5 step.

3.3 액적크기분포

액주의 액적분열은 액체와 기체의 상대적인 속도 차에서 오는 공력학적 힘과 액체의 물성인 점성과 표면장력 그리고 관성력의 함수로 표현된다 [3]. 선형이론에 따라 분사기 형상이 주액적 직경에 영향을 미치고 분열된 액적은 분열지점에서의 We_F 수에 따라 bag breakup region ($We < 80$), shear & boundary layer breakup region ($80 < We < 350$), catastrophic breakup region ($350 < We$)으로 구분할 수 있다 [13].

Figure 3에서 확인한 해석기법의 유효성을 바탕으로 test section 각 단면에서의 액적직경(D) 분포를 살펴보았다. Figure 4에서 액적직경은 10~130 μm 사이에 있었고 분사기 위치($z=0.0$ inch)에서의 대표적인 액적 직경은 45 μm 였다. 분사초기의 액적크기분포는 후류로 갈수록 범위가 넓어졌고 주위류에 의한 증발효과로 평균적인 크기가 줄어들었다. 후류의 $z=2.5$ inch 지점에서 측정된 대표 액적 직경은 35 μm 였다.

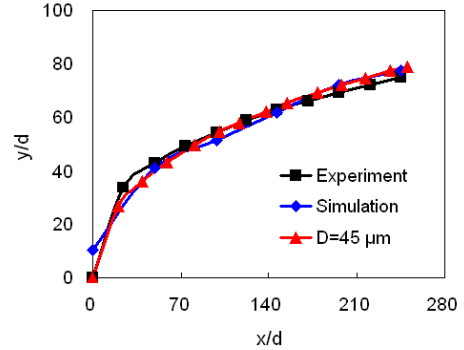


Fig. 5 Particle tracking of a single droplet, $D=45 \mu\text{m}$ with a consideration of evaporation during floating, which was compared with experimental and numerical results of a droplet trajectory.

액적의 기화는 외부에서 열을 받고 상변화 하여 그 크기가 줄어드는 정상상태(steady)와 액적 내부의 대류현상으로 열이 축적되어 비정상적으로 분열하는 과정을 거치게 된다 [14].

Figure 5는 Fig. 4에서 해석적으로 구한 $D=45 \mu\text{m}$ 액적 궤적을 Fig. 3에서의 실험적, 해석적으로 구한 액적 궤적과 비교한 그림이다. 세 곡선이 거의 일치하고 있다. 이를 통해 본 연구에서의 해석 방법이 실험을 잘 모사함을 알 수 있고 액적 궤적을 결정하는 대표적인 액적 크기는 $D=45 \mu\text{m}$ 임을 예측할 수 있었다.

액적의 거동은 항력계수와도 밀접한 관계를 가지게 되므로 후속 연구로 액적의 항력계수와 유동조건과의 관계를 밝히는 것이 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

모형 램젯 연소기에서 공급공기 방향에 수직으로 분사한 액체 핵산의 증기농도 측정을 해석적으로 수행하였다. 다상유동 해석을 이용하여 핵산 증기 물분율을 정량적으로 측정하였고 다음의 결론을 얻었다.

(1) FLUENT를 이용한 다상유동 해석에서 DPM(Discret Phase Method)은 핵산 증기 농도

예측에 유용한 기법임을 확인하였다.

(2) 수치해석을 통해 수직 분사되어 증발된 기체상태 핵산 농도분포는 실험값과 잘 일치하였다. 최대 농도지점은 주액적(primary droplet)과 이차액적(secondary droplet) 사이에 위치하였다.

(3) 연소기 내부에서 수직, 수평방향으로의 핵산 액적 분포 결과를 통해 각 지점에서 액적 크기를 해석적으로 예측하였다.

참 고 문 헌

1. 오정석, 윤영빈, "가스터빈에서의 연소불안정 현상", 한국추진공학회지, 제12권 제4호, 2008, pp. 63~77
2. 송진관, 안규복, 오정석, 윤영빈, 2006, "수직 분사제트의 액적영역 분무특성에 대한 연구", 한국액체미립화학회지, 제11권 제2호, pp. 113~120
3. 오정석, 이원남, 이종근, Dominique A. Santavicca, "수직분사제트에서의 핵산 증기 농도측정", 한국추진공학회지, 제14권 제4호, 2010, pp. 25~31
4. 오정석, 김민기, 허필원, 이장수, 윤영빈, "GE 7FA+e DLN-2.6 가스터빈 연소기 연구: Part I 운전조건 최적화", 한국추진공학회지, 제 12권 제5호, 2008, pp. 43~50
5. 오정석, 김민기, 허필원, 이장수, 윤영빈, "GE 7FA+e DLN-2.6 가스터빈 연소기 연구: Part II 모형 덤프 연소기 설계", 한국추진공학회지, 제12권 제5호, 2008, pp. 51~59
6. Sam S. Yoon, Stephen D. Heister, "Categorizing linear theories for atomizing round jets", Atomization and Sprays, vol. 13, 2003, pp. 499-516
7. Sirignano W.A., Mehring C., "Review of theory of distortion and disintegration of liquid streams", Progress in Energy and Combustion Science, vol. 26, 2000, pp. 609 - 655
8. 정희택, 이창효, 최병일, 한용식, 옥영욱, "미분무수 소화 노즐의 분무특성 예측을 위한 CFD기법의 적용", 한국전산유체공학회, 제11권 제4호, 2006, pp. 56~61.
9. Jeongseog Oh, Youngbin Yoon, "Flame stabilization in a lifted non-premixed turbulent hydrogen jet with coaxial air", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 35(19), 2010, pp. 10569-10579
10. Drallmeier, J.A., "Hydrocarbon vapor measurements in fuel sprays: A simplification of the infrared extinction technique", Applied Optics, vol. 33(30), 1994
11. Drallmeier, J.A., "Hydrocarbon-vapor measurements in pulsed fuel sprays," Applied Optics, vol. 33(33), 1994
12. Stenzler, J.N., "Modulated jets in a crossflow for active combustion control", Penn state university, Ph.D thesis, 2005
13. Liu Z, Leitz RD, "An analysis of the distortion and breakup mechanisms of high speed liquid drops", International Journal of Multiphase Flow, vol. 23(4), 1997, pp. 631-650.
14. Gary LB, Kenneth WR, Combustion Engineering, 1st edition, McGraw-Hill, USA, 1998