

모형 가스터빈 연소기에서의 분무 및 연소 특성

황진석* · 구자예** · 성홍계** · 강정식***

Spray and Combustion Characteristics in Model Gas Turbine Combustor

Jin-Seok Hwang* · Hong-Gye Seong** · Ja-Ye Koo** · Jeong Seek Kang***

ABSTRACT

Jet-A spray, evaporation and combustion were numerically analyzed in annular type model combustor using KIVA-3V. Liquid fuel's atomizing was affected by flow field near droplet. When cooling flow was not optimized, SMD was increased, and equivalence ratio was horizontally distributed in combustor's downstream. Flame spread out horizontally and separated in combustors downstream. Flame center was separated by cooling flow. Flame separation made local high temperature in downstream that caused NO increase.

초 록

액체 연료를 사용하는 가스터빈 연소기에서의 분무 및 연소 특성을 알아보기 위해 본 연구에서는 KIVA-3V를 이용하여 애놀러형 모형 가스터빈 연소기에서 Jet-A의 분무와 연소에 의한 열유동 현상을 수치해석을 통하여 연구하였다. 홀을 통해 유입되는 냉각유동이 있을 경우, 유입 유동이 최적화되지 않으면 액체연료의 분무는 주위 유동장의 영향을 크게 받아 후류에서 SMD가 증가하고, 등가비의 수직적 분포가 일어나기 어렵게 된다. 화염이 연소실의 중앙 부분에서 좌우로 넓게 발생하며, 유동에 의해 화염의 후류가 갈라지는 현상이 있었으며 이로 인해 화염중심부가 분리되고 국소적인 고온부가 생성되어 NO의 발생이 증가하는 영역이 발생하였다.

Key Words: Model Gas Turbine combustor(모형가스터빈연소기), Spray(분무), Combustion(연소), Equivalence Ratio(등가비), Jet-A(제트유)

1. 서 론

가스터빈 엔진은 항공기용으로는 추력을 발생시키고, 산업용으로는 주로 동력을 발생시키기 위해 사용한다. 특히 항공기용으로 사용되는 가스터빈은 광범위한 환경조건에서 사용가능하도록 설계되어야 하며, 추가로 공해물질의 배출량이 최소가 되도록 설계되어야 한다. 이러한 가스

* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

*** 한국항공우주연구원 항공사업단 엔진팀
연락처, E-mail: hjs586@hanmail.net

터빈에 설계에 대한 요구들은 대체적으로 연소실 설계에서 충족시켜야 한다.

가스터빈 연소실에서 일어나는 연소과정은 액체연료의 미립화, 공기와 연료의 혼합, 혼합기체의 연소의 과정으로 진행된다. 그러나 실제 연소기의 내부 유동 현상은 고온, 고압 상태하의 연소기 작동조건으로 인해 계측에 많은 어려움이 있기 때문에 수치해석 방법을 통하여 해결하고 있다. 분무와 증발, 연소 현상이 동시에 발생하는 연소기의 경우, 실험 자료가 부족하여 해석 모델에 대한 실제 현상과의 비교가 어렵지만, 수치해석 방법은 여러 조건에 대해 해석적인 답을 구할 수 있다.

2. 해석 방법

2.1 액적 미립화 및 증발 모델

연료 분무를 포함하는 유동장의 수치해석에서는 각각의 액적들을 따라 움직이며 액적들의 질량, 운동량, 에너지 변화를 계산한다. 그리고 이러한 계산결과가 전체 유동의 지배방정식의 생성항으로 작용한다.

액적의 분열을 계산하기 위한 모델로서 복합 모델을 이용한다. 이는 액적의 크기에 따라 분열 매커니즘이 다름을 고려한 모델로서 1차 분열로는 선형 불안정 이론에 근거한 Wave 모델을, 2차분열 모델로는 액적의 변형에서의 비선형 효과를 고려하여 개발된 DDB 모델을 이용한다. 초기에는 1차 분열 모델을 이용하고 분사된 액적의 최대 직경의 95%가 되는 경우 2차 분열 모델을 이용하도록 하였다[2].

Wave 모델은 반경 a 를 갖는 모액적으로부터 반경 r 을 갖는 새로운 액적으로 분열이 일어나며, 새로운 액적의 크기는 모액적의 표면에서의 최대 성장률 Ω 에 해당하는 파장의 크기 Λ 에 의해 결정된다.

$$r_c = B_0 \Lambda \quad (1)$$

B_0 는 모델 상수로서 0.61 정도이다. 액적의

분열과정 중 모액적은 질량 감소에 따라 그 직경이 감소하게 된다.

$$\frac{da}{dt} = -\frac{(a-r)}{\tau} \quad (2)$$

여기서 τ 는 액적 분열시간을 나타내며 다음과 같이 정의된다[5].

$$\tau = \frac{3.726 B_1 r}{\Omega \Lambda} \quad (3)$$

DDB 모델의 방정식은 다음과 같다.

$$K \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{4N}{Re} \frac{1}{y^2} \frac{dy}{dt} + \frac{27\pi^2}{16 We} y [1 - 2(cy)^{-6}] = \frac{3}{8} \quad (4)$$

여기서 K 는 액체와 가스사이의 밀도비이고 N 은 액체와 가스사이의 점도비이며 y 는 액적의 찌그러짐 상수이다. DDB 모델에서 액적의 분열이 일어나기 위한 임계조건은 다음과 같다.

$$\frac{a}{r} = \frac{We}{6\pi} \quad (5)$$

액적은 증발을 통해 점점 크기가 작아지게 되고 결국 소멸하게 된다. 따라서 액적의 반경 변화율을 통해 증발을 계산할 수 있다. 액적의 초기 크기분포는 노즐의 반지름 크기를 중심으로 χ^2 분포를 이용하며 액적의 반경변화율은 다음과 같이 주어진다.

$$R = -\frac{(\rho D)_{air}(\hat{T})}{2\rho_d r} \frac{Y_l^* - Y_l}{1 - Y_l^*} Sh_d \quad (6)$$

여기서, Sh_d 는 셔우드 수이며 Y_l^* 는 액적 표면에서의 질량분율을 나타낸다. 기화에 의한 액적의 온도 변화는 에너지 방정식에 의해 주어진다.

$$\rho_d \frac{4}{3} \pi r^3 c_l \dot{T}_d - \rho_d 4\pi r^2 RL(T_d) = 4\pi r^2 Q_d \quad (7)$$

c_l 은 액체의 비열이고, $L(T_d)$ 는 액체의 증발잠열이다. Q_d 는 단위면적당 액적 표면에서의 열전도율로 Ranz- Marshall correlation에 의해 주어지며, 식(7)을 반복계산하여 액적의 온도를 구한다.

22 혼합 제어 난류 연소 모델

혼합 제어 난류 연소 모델은 연소율을 난류 화염에서 간헐적으로 존재하는 반응 화학종의 계산을 위해 이용한다. 이 모델은 와의 소산율과 연소율을 관련시키며, 반응 화학종의 평균 질량 분율에 의한 반응율, 난류 운동 에너지와 소산율로 나타난다. 난류 화염 속도는 난류 에너지 k 의 제곱근과 층류 화염 속도와 유사한 주위 환경에 의해 생성되며 난류 소산은 관여하지 않는다.

주요한 특징은 확산화염과 예혼합화염을 묘사할 수 있다는 점이다. 확산화염에서 연료와 산소는 분리된 와에서 발생한다. 그러므로 대부분의 화학반응은 매우 빠르며, 이는 연소율이 분자단위의 연료와 산소의 와의 내부 혼합율로 결정된다고 가정할 수 있다. 이를 다른 말로 하면 와의 소산율에 의해 연소율이 결정된다. 그러므로 양이 간헐적으로 변동하는 연료와 산소는 변동과 화학종의 평균 질량 분율의 관계가 될 것이다. 그 결과로 소산율은 반응 화학종의 평균 질량 분율로 표현될 수 있다. 화학종이 부족한 연소에서 연소율은 제한될 것이다.

예혼합 화염은 연료와 산소가 같은 와에 존재하는 경우 발생한다. 이러한 와들은 뜨거운 연소 생성물을 포함하는 와들로 분리된다. 이러한 경우 연소율은 앞에서 설명한 것과 같은 방법으로 가정한 국소 화염 확산에 의해 결정된다. 그러나 뜨거운 와들의 소산에 대해 추가적인 방정식이 필요하며, 반드시 뜨거운 연소 생성물의 질량 분율이 작은 경우 추가되어야 한다[1].

23 사용 연료와 반응기구

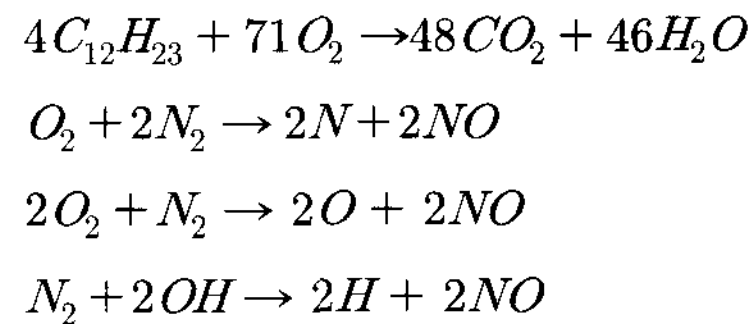
항공연료로서 Jet-A는 낮은 증기압을 가지고 있으며, 화재 위험성이 낮고, 높은 발열량을 가지고 있는 장점이 있다. 증기압이 낮은 장점은 항공기가 운행하는 고고도의 낮은 압력하에서도 연료계통의 증기폐색을 방지하는데 장점이 되기도 하지만, 연소실 내에서는 증발이 잘 이루어지지 않기 때문에 재시동이 어렵다는 단점이 될 수 있다. Jet-A는 항공연료로서 여러 종류의 화학성분으로 구성되어 있으며, 이러한 경우 연소

Table 1 Property of Jet-A

| Property | Value |
|-------------------------|-----------------|
| Chemical symbol | $C_{12}H_{23}$ |
| Molecular weight | 176.315 |
| Critical temperature | 668 K |
| Heat of formation (0 K) | 72.53 kcal/mole |
| Surface tension (350 K) | 18.85 dynes/cm |

화학반응에 대한 계산이 매우 복잡하기 때문에 가정이 필요하다. 계산에 사용한 Jet-A는 South Florida Model로서 Table 1과 같은 물성치를 갖는다[3].

연료는 많은 수의 탄소를 가진 탄화수소로 구성되어 있기 때문에 연소과정을 해석하는데 매우 복잡하다. 이를 해석하기 위해 많은 화학 반응 기구가 개발되어 왔다. 이러한 반응 기구들은 간단하게는 한 두 단계, 많게는 수백단계의 요소 반응을 포함한다. 여기서는 NO_x발생을 고려하는 총 4단계의 화학반응을 고려한다[1, 4].



24 가정 및 경계조건

분무 및 연소반응을 계산하기 위한 격자는 애널리 형태의 연소실을 간략하게 묘사한 모델 연소실로서 연소실 입구 이외에 연소실 내 온도 감소를 위한 10개의 홀이 있다. 각 부분의 치수는 Fig. 1 과 같이 작성하였으며, 32×30×74의 격자개수를 갖는다. 입구의 격자를 포함하여 총 8만여개의 격자점으로 이루어져 있으며, 격자 형태는 Fig. 2 와 같다.

입구조건은 20 m/s, 1.2 MPa, 600 K의 공기가 유입되며, 공기 유입부들은 모두 압축기를 통과한 압축기체로서 온도 및 압력조건은 전면 입구와 같다고 가정한다. 분무는 직경 1 mm의 노즐로서 60°의 분무각 가지며, 30 m/s 로 분사된다. 초기 액적크기는 SMD 40 μm로 가정하며

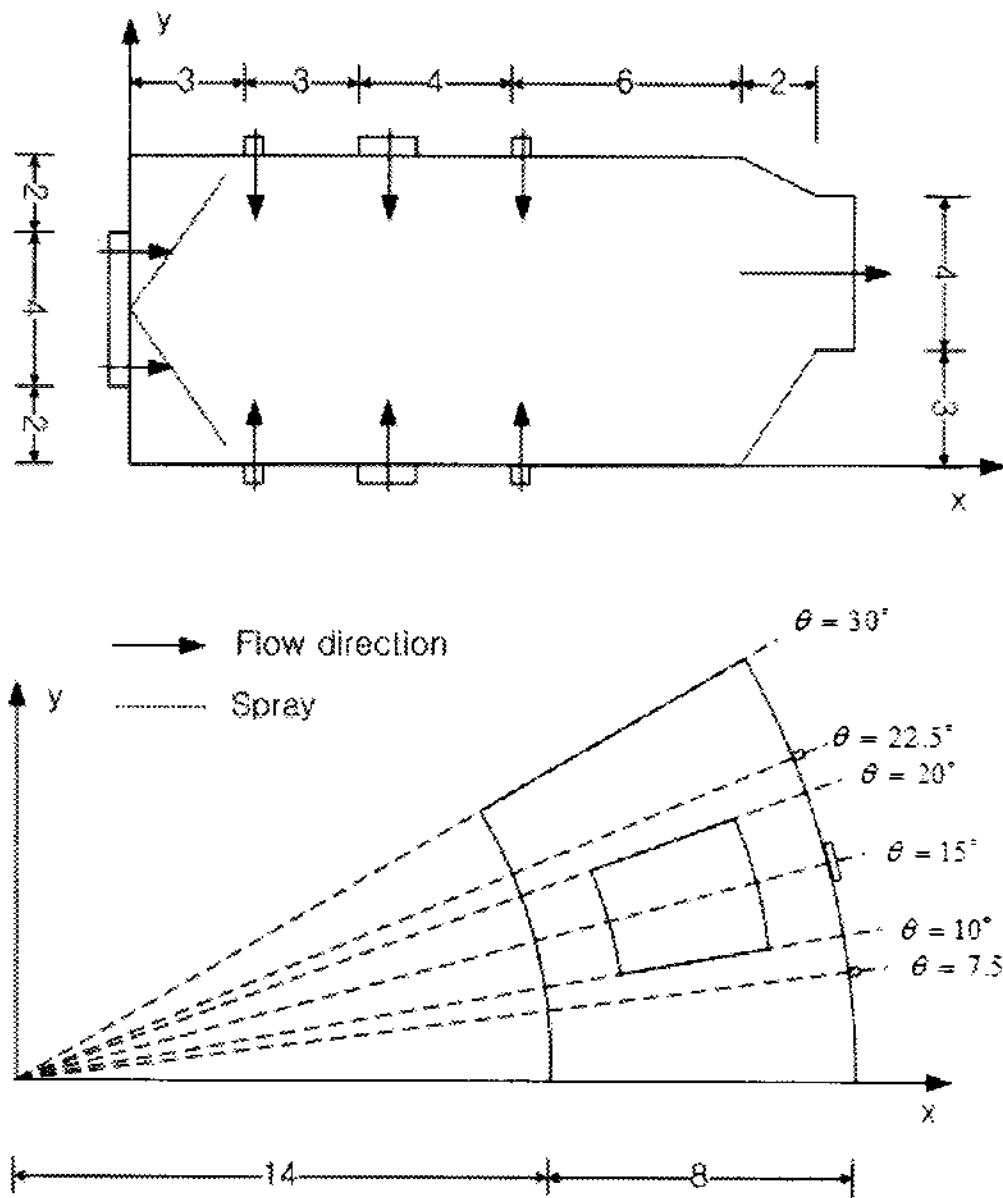


Fig. 1 Geometry of model combustor

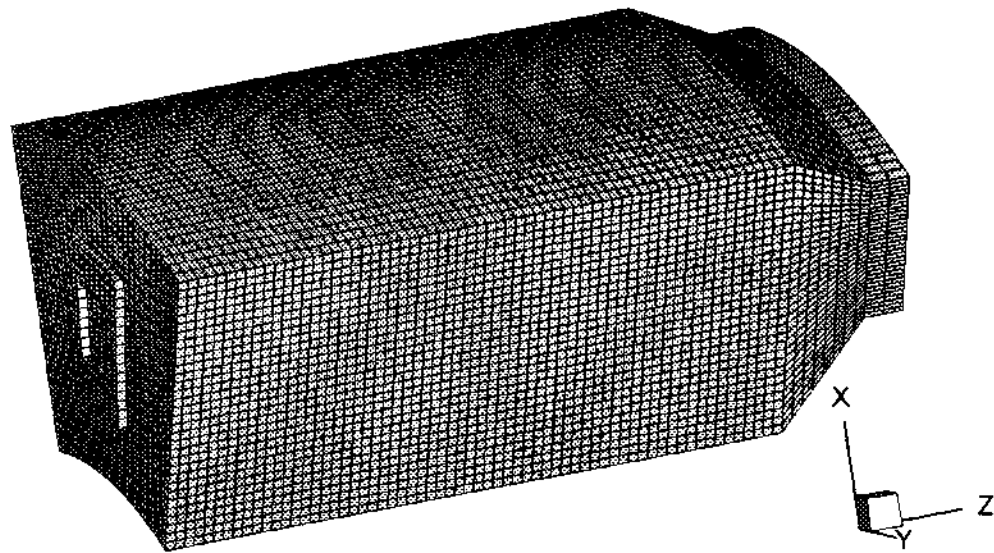


Fig. 2 Computational grid

액적 크기의 분포는 χ^2 분포를 이용하고, 액적 추적은 60000개를 고려하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 분무 특성

연소에 의한 화학반응을 고려하기 이전에 연소실에서 액체 연료의 미립화와 증발현상을 알아보기 위해 화학반응을 제외한 분무 특성에 대해 알아본다. 이는 연소실 내에서 액체 연료의 증발에 의해 연료가 공기와 혼합이 이루어지는

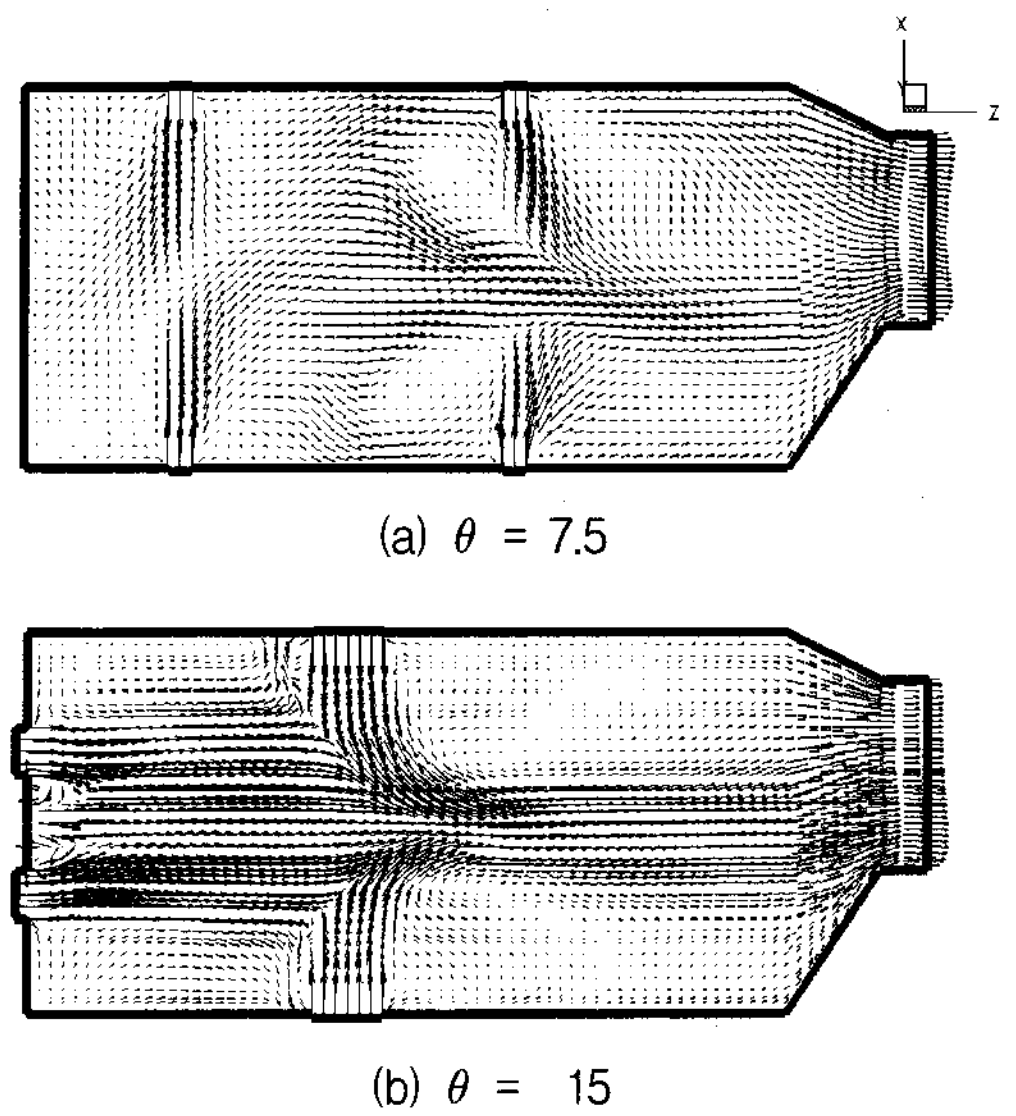


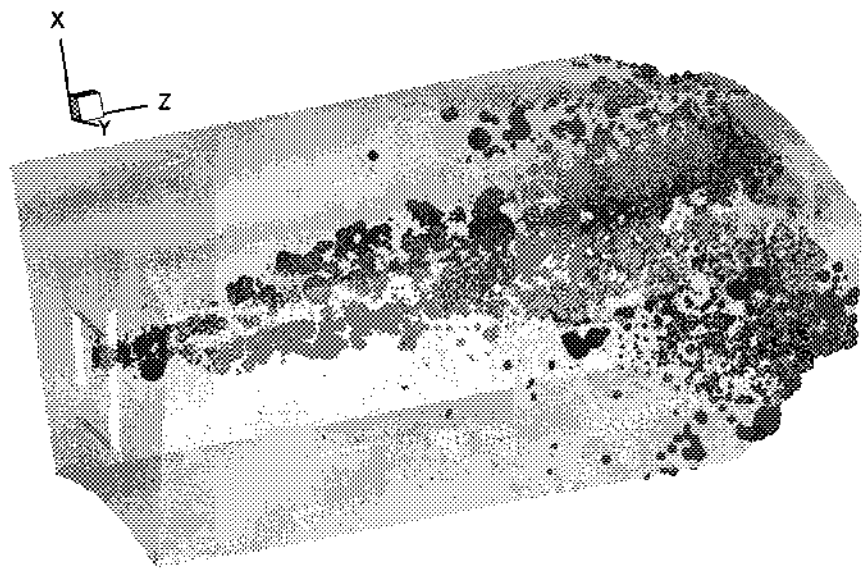
Fig. 3 Velocity distribution in combustor at $\theta = 0$ and 7.5.

위치를 알 수 있으며, 화염이 발생하게 될 위치에 대해 예측할 수 있다.

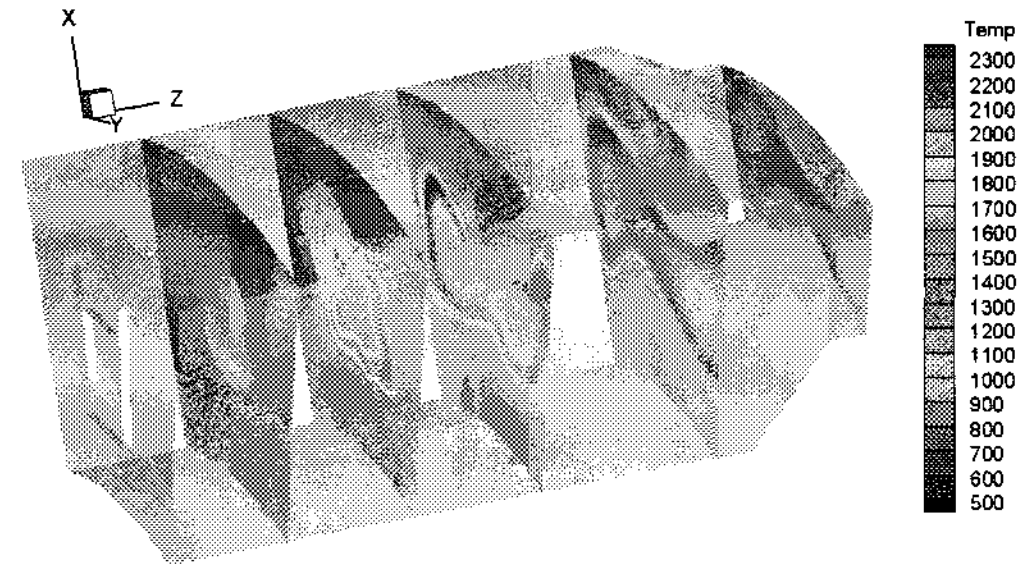
Figure 3은 분무가 있는 경우 연소실 내부 단면에서의 속도장을 나타낸 그림이다. 유동의 변화가 심한 홀이 존재하는 단면에서 나타내었다. Fig. 3의 (a)는 $\theta = 7.5$ 인 지점으로 작은 홀이 존재하는 부분에서의 단면의 속도장이다. 후방의 작은 홀은 측면에서 앞으로 다시 순환시켜주는 유동을 발생시키고 있다. Fig. 3의 (b)는 계산 격자 중앙부분에 큰 홀이 존재하는 단면에서의 속도장으로, 수직으로 만나는 두 공기의 흐름이 연소실의 상하에 재순환영역을 발생시킨다. 이러한 재순환 영역에서는 유동속도가 공기 유입속도에 비해 느린 속도로서 화염의 유지에 도움이 된다.

Figure 4는 연소실 내에 분사되는 Jet-A와 그 증발특성을 알아보기 위한 액적의 분포, SMD와 등가비를 Z 방향의 거리별로 나타내었다.

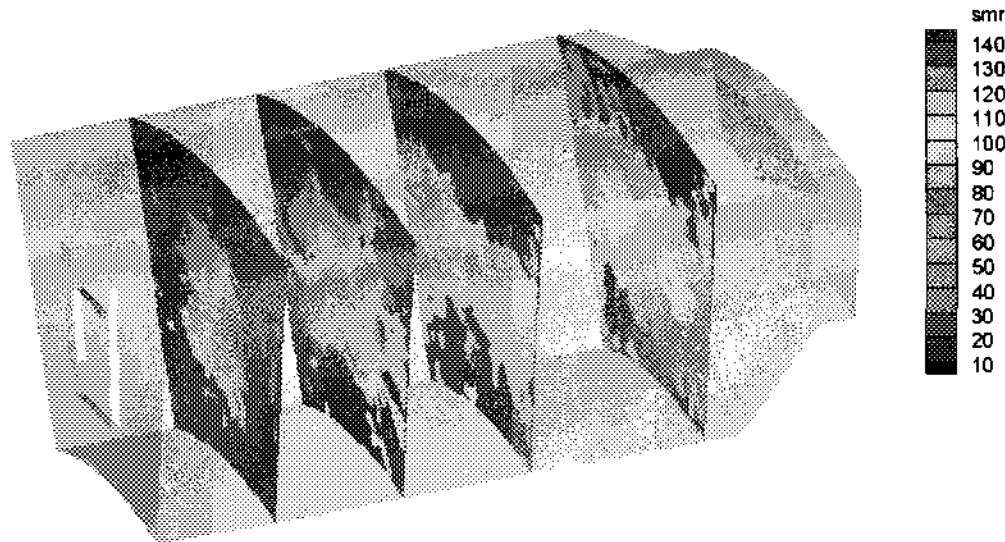
Figure 4의 (a)는 액적의 분포를 나타낸다. 노즐에서 액적의 크기는 χ^2 분포에 의해 약 $40 \mu m$ 의 크기로 분사되는데, 큰 액적이 발견되는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 3의 (b)에서 형상에 의해 노즐 주변에서의 유동 역류에 의해 작은 액적들이 일부는 연소실로 분포되지 못하고 노



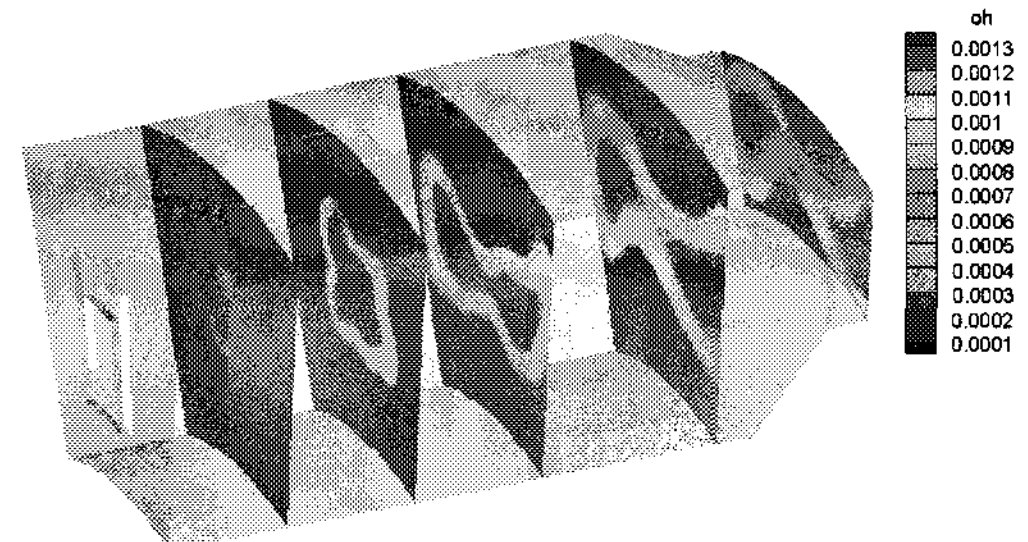
(a) Droplet distributions



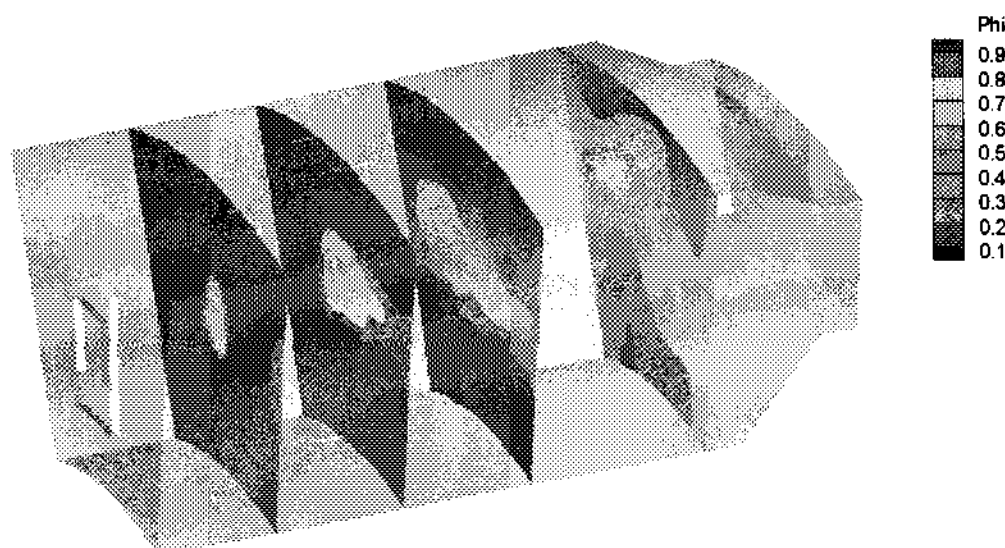
(a) Temperature



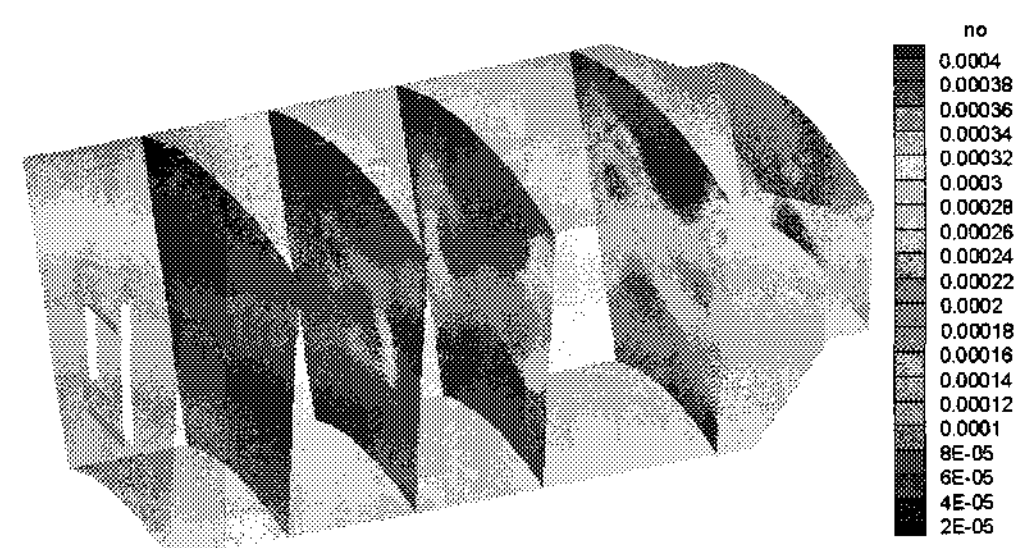
(b) SMD



(b) Mass fraction of OH



(c) Equivalence ratio



(c) Mass fraction of NO

Fig. 4 Droplet distributions, SMD and Equivalence ratio without combustion in combustor at $z = 3.25, 6.75, 10.25$ and 15 .

Fig. 5 Temperature, OH and NO distribution in combustor at $z = 3.25, 6.75, 10.25, 15$ and exit.

즐 주변으로 역류하여 충돌 및 융합을 통해 크고 작은 액적들이 분포하는 것으로 보인다. Fig. 4의 (b)는 연소실에서의 SMD 분포를 보여주고 있다. 연소실 입구방향으로 비교적 작은 액적들이 분포하고 있으며, 후방으로 갈수록 큰 액적들이 관찰되는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 냉각을 위한 홀들에 의해 분무 액적들이 수직방향으로 퍼지지 못하고 뭉치게 되어 발생하는 현상으로 보인다. 또한 중앙의 큰 홀을 지난 이후 SMD의 분포가 좌우로 갈라지는 것을 볼 수 있다. Fig.4 의 (c)는 Jet-A의 등가비 분포로서 전방

에서 액체연료의 등가비 분포가 고르지 않지만 후방으로 진행되며 등가비 분포가 먼저 수평방향으로 고르게 퍼지며 연소실 후방에서 상하방향으로 고르게 퍼지는 것을 볼 수 있다. 또한 등가비의 분포도 SMD의 분포와 같이 좌우로 나뉘어져서 분포하는 것을 볼 수 있다.

3.2 연소 특성

연소반응은 점화 연소와 동시에 자연 발화를 동시에 고려하여 계산하였다. 점화연소는 계산 격자내의 일정 구역에 에너지를 가하여 짧은 시

간에 높은 온도를 갖도록 하여 공기-연료 혼합기체가 점화되는데 필요한 에너지를 주는 방법이며, 자연 발화는 점화 이후에 발생한 고온에 의해 주변 공기-연료 혼합기체로 화염이 전파되고 유지되는 것을 고려하도록 함이다.

Figure 5는 연소반응을 고려한 연소실 내의 온도, OH와 NO의 분포이다. Fig. 5의 (a)에서 연소실 내의 온도분포를 볼 수 있는데 연료가 비교적 집중적으로 존재하는 전방에 비해서 연료가 넓게 분포하는 후방에서 높은 온도가 나타나는 것을 볼 수 있으며, 중심부의 큰 홀에 의해서 고온부의 형태가 ∞ 모양으로 중심부가 좁아지는 것을 볼 수 있다. Fig. 5 (b)는 중간생성물로서 OH의 분포를 나타낸다. OH 분포는 탄화수소의 산화를 발생시키는 중간 매개체로서 존재하는 구역에서 화학반응이 일어나고 있음을 알 수 있다. 비교적 온도가 높은 화염의 외부에서 OH가 존재하며, 특히 연소실 출구부분의 중앙에서 많은 양이 존재하고 있다. Fig. 5의 (c)는 NO의 분포를 나타낸다. OH의 분포와 비교하여 비교적 더 넓은 분포를 가지고 있으나, 연소생성물의 질량 분율로 비교할 경우 OH가 더욱 많은 양으로 집중적으로 존재하고 있는 차이가 있다.

4. 결 론

모형 환형 가스터빈 연소실에서의 분무 및 연소반응 계산을 계산하여, 속도장과 액적, SMD, 온도, 반응생성물의 분포에 대해 알아보았다.

분무는 주위 유동장의 영향을 크게 받는다. 노즐입구에서의 역방향 속도에 의해 노즐 입구에서 크고 작은 액적들이 많이 발생하며, 연소실 전반부에서는 액체연료가 연소실에 충분히 분포되지 못한다. 또한 홀에서 유입되는 공기에 의해서 액적이 고루 분포되지 못하고 후류로 갈수록 큰 액적들이 분포하게 되며, 연료 증기의 수직적인 분포가 일어나기 어렵게 된다.

등가비의 분포에 따라 화염이 좌우로 넓게 발생하며, 중심부에 존재하는 큰 홀에 의해서 화염

이 갈라지는 현상이 발견되었다. 이는 하나의 화염을 연소실 후방에서 둘로 나누게 되며, 두 개의 화염 중심부 사이에서 발생하는 고온부에 의해 국소 NO의 발생량이 증가하는 것을 볼 수 있다.

후 기

본 연구는 한국형 헬기 민·군겸용구성품 개발사업 위탁연구로 한국항공우주연구원의 지원에 의해 수행되었습니다. 지원 감사합니다.

참 고 문 헌

1. Ke Su, "Numerical Simulations of Gas Turbine Combustion," Purdue University, 2002.
2. Sung Wook Park, Hyung Jun Kim and Chan Sik Lee, "Numerical and Experimental Analysis of Spray Atomization Characteristics of a GDI Injector," KSME International Journal, Vol. 17 No.3, pp.449~456, 2003.
3. H.L. Nguyen, "Critical Evaluation of Jet-A Spray Combustion Using Propan Chemical Kinetics in Gas Turbine Combustion Simulated by KIVA-II," AIAA/SAE/ASME/ASEE 26th Joint Propulsion Conference, 1990.
4. A. A. Amsden, P. J. O'Rourke and T. D. Butler, "KIVA-II: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays," Los Alamos National Laboratory report LA-11560-MS, 1989.
5. 이관형, 황진석, 김두만, 구자예, "횡단류에 분사되는 액체 제트의 분무 및 연소 특성," 한국항공우주학회지 제 34권 제 12호 pp 48-58, 2006.