

# Wedge형 보염기를 장착한 동축형 연소기의 반응 유동장 수치해석

고 현\* · 성 홍계\*

## Numerical Analysis on the Reacting Flow-Field of Coaxial Combustor with a Wedge-Shaped Flame Holder

Hyun Ko\* · Hong-Gye Sung\*

### ABSTRACT

A numerical analysis is performed to analyze the reacting flow-field of an axisymmetric coaxial ramjet combustor. Two dimensional Navier-Stokes equation with low Reynolds number  $k-\epsilon$  turbulence model is utilized and finite-rate chemistry model is adopted. Eddy dissipation model is applied for a modeling of turbulent combustion. Two different types of combustors (combustor with a suddenly expanded dump and combustor with wedge-shaped flame holders) are compared in a view point of flame stabilizing.

### 초 록

축대칭 동축형 램제트 연소기에 대한 반응 유동장 해석을 수행하였다. 2차원 축대칭 Navier-Stokes 방정식과 낮은 레이놀즈 수  $k-\epsilon$  난류 모델을 이용하였고, 유한반응률 화학반응 모델을 적용하였다. 난류 연소 모델인 EDM (Eddy-Dissipation Model)과 층류 반응 모델을 적용한 경우를 서로 비교하였다. 급확대 연소기와 wedge형 보염기를 장착한 동축형 램제트 연소기에 대한 반응 유동장 수치해석을 통해 두 가지 결과를 화염안정 측면에서 서로 비교하였다.

Key Words: Coaxial combustor, Ramjet, Reaction, Sudden expansion, Flame holder, Eddy dissipation model

### 1. 서 론

램제트 연소기는 빠른 유동 유입 속도 하에서도 높은 연소효율을 발휘하기 위하여 램제트 시

스템 내에서 발생하는 압력손실은 최소화하되, 화염안정이 성공적으로 이루어지도록 설계되어야 한다. 압력손실을 최소화하기 위해서는 램제트 엔진 내 공기역학적 항력이 최소화되도록 하여야 하는 반면에, 화염안정화를 위해서는 항력 발생이 불가피하여 램제트 엔진 설계가 매우 까다

\* 국방과학연구소 기-4-9  
연락처, E-mail: hgsung1@hanafos.com

롭다는 특성이 있다. 연소기의 설계는 추진체의 공기역학적인 측면과 임무 측면에서 고려되어야 하며, 크게 부스터 분리형과 부스터 일체형으로 구분할 수 있다.

부스터 분리형의 경우, 연소를 용이하게 하기 위해 기계적인 보염기를 다양한 방법으로 구성할 수 있다. 연소실을 부스터 모드와 램제트 모드에서 공유하는 일체형 램제트는 소형화 할 수 있다는 장점으로 단거리 혹은 중거리 임무 수행에 가장 적합하지만, 연소실의 길이가 부스터 모드에서 사용되는 고체 연료의 부피에 의해 제한되고, 고체 연료 때문에 기계적인 화염 안정화 장치를 이용할 수 없어, 공기역학적인 방법에 의해서만 화염안정화가 이루어져야한다[1].

일체형 로켓-램제트에(Integral Rocket-Ramjet, IRR) 사용되는 연소기 중 급확대면을 갖는 덤프형 연소기는 항력을 최소화할 수 있지만, 화염을 안정화 시키는데 어려움이 있다. 램제트의 경우, 연소실로 유입되는 공기/연료 혼합물의 속도가 화염속도(flame speed)에 비해 상당히 빠르기 때문에 화염안정화를 위해서는 충분한 유동 재순환 영역이 형성되어야 하고, 높은 연소 효율을 위해서는 연소실의 길이가 충분해야 한다.

본 논문에서는 wedge형 보염기가 장착된 동축형 램제트 연소기와 급확대면이 보염기로 작동하는 연소기에 대한 반응 유동장 수치해석을 통해 두 가지 형태의 연소기를 서로 비교해 보고자한다. 또한, 난류 반응 모델인 EDM(Eddy-Dissipation Model)과 층류 반응 모델을 적용한 경우를 서로 비교하였다.

## 2. 수치 해법

본 연구에서는 축대칭 Navier-Stokes 방정식과 Yang & Shih [2]에 의해 제안된 저 레이놀즈수  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다. 낮은 마하수에서 시간 전진기법의 수렴가속을 위해 예조건화 기법을 적용하였다[3]. 시간적분을 위해 LU 근사 인자분해 기법을 적용하여 대수 방정식을 블록-대각 행

렬로 변환하여 시간적분을 수행하는 LU-SGS (Lower-Upper Symmetric Gauss-Seidel) 기법을 적용하였다. 이때, 유속 자코비안은 spectral-radius를 고려한 근사 자코비안으로 분할하였다. 셀 경계에서 플럭스 계산을 위해 AUSMPW+ 기법을 이용하였고, 유동변수에 대한 MUSCL 외삽 기법을 이용하여 고차의 공간 정확도를 갖게 하였다. 예조건화된 지배방정식에 대한 수치 플럭스의 계산을 위해, Liou 등[4]이 AUSM+ 기법에 예조건화 기법을 적용하면서 제안한 가상 음속을 이용하여 기존의 AUSMPW+ 기법을 수정하여 적용하였고, 점성항에 대해서는 중심차분법을 적용하였다. 이중시간전진기법(Dual-time stepping method)을 적용하여, 내부 반복계산에서는 예조건화 기법을 통해 계산하고, 물리적 시간에 대하여 시간 전진하도록 하였다. 이때, 물리적 시간항은 2차 정확도를 갖도록 차분하였다.

## 3. 연구 내용

### 3.1 해석 대상 및 조건

본 연구에서 해석 대상인 동축형 연소기는 Fig. 1과 같다. 연소실 길이( $L_c$ )는 1400 mm이고, 연소실 반경( $R_c$ )는 165 mm, 연소실 입구 반경( $R_i$ )은 106 mm, 노즐 목 반경( $R_t$ )은 123 mm이다. Figure 1의 a)는 급확대면 이후의 유동 재순환 영역이 보염기 역할을 하고, b)는 동일한 연소실에서 급확대면이 없이 wedge 형 보염기를 장착한 경우이다.

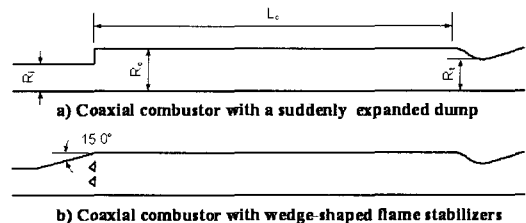
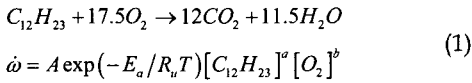


Fig. 1 Geometry of coaxial combustors

고도 15 km에서 Mach 수 3.0의 비행 조건에 대해 해석하였고, 흡입구와 연소실을 포함한 램제트 전체 반응 유동장에 대해 해석을 수행하였다. 연소실 입구 전방 200 mm 위치에서 기상의 연료(Jet-A 혹은 propane)가 연소실 입구 단면에서 균일한 질량분율을 유지하면서 분사된다고 가정하였다. 본 논문에서 사용한 Jet-A의 화학 반응식은 KIVA-II의 1단계 광역화학반응 모델로 식 (1)과 같다. 여기서  $A = 3.0 \times 10^{11}$ ,  $E_a = 30000$ ,  $a = 0.25$ ,  $b = 1.5$ 이고, cgs 단위이다.



### 3.2 급확대 연소기

급확대면을 갖는 연소기에 대해 흡입구 유입 공기량을 기준한 당량비 0.5의 조건에서는 연료가 희박하고, 연소실 입구 속도가 너무 빨라 화염이 형성되지 않아, 당량비를 0.8로 하여 해석을 수행하였다.

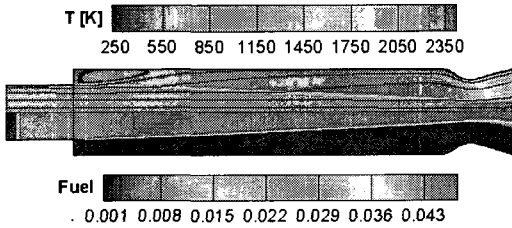


Fig. 2 Temperature and fuel mass fraction of a sudden dump combustor at  $\phi = 0.8$

Figure 2는 연소기의 온도와 유선(상) 그리고 연료분포(하)를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 유동 재순환 영역인 고온 영역에서 지속적으로 반응에 필요한 에너지를 공급하여 연소실 내부에서 반응이 일어남을 알 수 있다. 하지만, 연소실로 유입되는 공기/연료 혼합물의 속도가 200 m/s 정도 이어서 미연 공기/연료 혼합물의 potential core가 노즐을 통해서 빠져 나가게 되

어 상당량의 연료가 연소되지 않은 상태로 배출된다. Potential core가 연소실 내부에서 종료되기 위해서는 연소실의 길이가 더욱 길어져야 한다. Figure 3은 급확대 연소실의 길이를 2배로 확장한 후, Fig. 2와 동일한 조건에서 해석한 결과이다. 이 경우 potential core는 연소실 내부에서 종료되고, 분사된 연료도 완전히 내부에서 연소되는 것을 볼 수 있다. 하지만, 램제트엔진의 작동을 위하여 연소실의 길이를 증가하는 것은 무게절감 측면에서 바람직하지 않은 면이 있다.

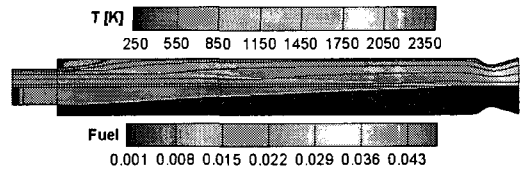


Fig. 3 Temperature and fuel mass fraction of a sudden dump combustor at  $\phi = 0.8$  (two times long combustion chamber)

### 3.3 Wedge 형 보염기를 장착한 연소기

Figure 2와 동일한 연소실 길이를 유지하면서 급확대 연소기에서 발생하는 연소실 길이 증가 문제를 피하기 위해, Fig. 1-b와 같이 급확대면 위치에 wedge 모양의 보염기를 장착한 경우에 대한 반응 유동장 해석을 수행하였다. 2개의 wedge형 보염기의 높이는 35 mm이고 둘 사이의 간격은 15 mm로 하였다. 연소실 전방 200 mm에서 기상의 Jet-A 연료를 당량비 0.5로 분사하였다.

Figure 4는 온도분포와 유선 그리고 Mach 수 분포를 보여준다. Wedge 후방에 counter-rotating vortex가 생성되어, 화염이 유지되고, wedge를 지나서 유동이 가속되지만, 유동 재순환 영역 이후에 충분히 감속되어 연소실 내부에서 연소되는 것을 볼 수 있다. Figure 2와 비교하면, 급확대 연소기와 동일한 연소실 길이를 갖으면서도 화염안정화 및 연소효율 측면에서는 유리함을 알 수 있다.

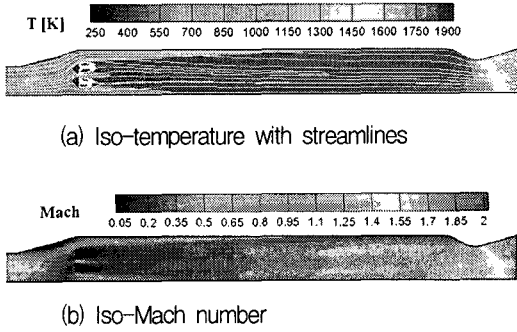


Fig. 4 Temperature and Mach number contours of a coaxial combustor with a two-stage wedge shaped flame holder at  $\phi = 0.5$

Figure 5는 3개의 wedge로 구성된 보염기 장착된 상태에 대한 해석 결과를 보여준다. Wedge의 높이는 20 mm로 하였고, 수직 방향으로 20 mm의 간격으로 배치하였다. 당량비 0.5의 동일한 조건에 대한 것으로, Fig. 4에 비해 wedge를 통과한 유동이 더 빠르기 때문에 화염이 상대적으로 하류에 생성되고 있다. 보염기의 크기, 간격 등을 고려하지 않는다면 화염이 blow-off될 수 있음을 알 수 있다.

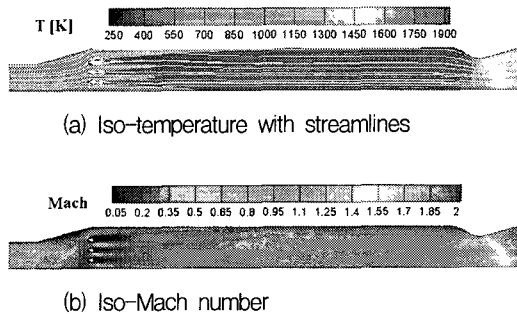


Fig. 5 Temperature and Mach number contours of a coaxial combustor with a three-stage wedge shaped flame holder at  $\phi = 0.5$

### 3.4 Eddy-dissipation model

난류 연소 모델 EDM[5]은 Eddy Break-Up 모

델을 비예혼합 화염으로 확장한 모델로서 난류에 의한 혼합을 화학반응의 rate-controlling 메커니즘으로 가정하여 화학종의 생성율을 평균 유동변수의 형태로 묘사하는 모델이다. 하지만 전 유동 영역에서 화학반응이 항상 난류 혼합에 의해서만 지배받지는 않기 때문에, 본 연구에서는 Arrhenius 형태의 층류 화학반응 모델과 식(2)와 (3)의 EDM 모델로 계산된 화학종의 생성율을 비교하여, 국부적으로 느린 즉, 반응을 지배하는 값을 식 (4)와 같이 구하는 hybrid kinetic/eddy-dissipation model [6]을 적용하였다.

$$\dot{\omega}_{k,r}|_{react} = v'_{k,r} M_{w,k} A \rho \frac{\epsilon}{k} \min\left(\frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}}\right) \quad (2)$$

$$\dot{\omega}_{k,r}|_{prod} = v'_{k,r} M_{w,k} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \left(\frac{\sum_p Y_P}{\sum_j v'_{R,r} M_{w,j}}\right) \quad (3)$$

$$\dot{\omega}_{k,r} = \min\left(\dot{\omega}_{k,r}|_{kin}, \dot{\omega}_{k,r}|_{react}, \dot{\omega}_{k,r}|_{prod}\right) \quad (4)$$

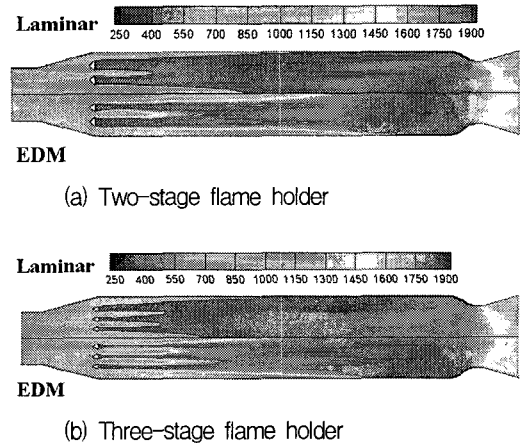


Fig. 6 Comparison of results between a laminar chemical reaction and eddy-dissipation turbulent chemical reaction model

Figure 6은 wedge형 보염기를 장착한 연소기에 대해, 층류 화학반응 모델과 EDM 모델을 적

용하였을 경우의 해석 결과를 보여준다. 층류 화학반응 모델에 비해 EDM 모델의 해석결과가 화염면 생성 위치가 하류에 존재함을 알 수 있다. 이는 식 (4)에서 알 수 있는 바와 같이, 벽 근처와 보염기 후방에서 난류 혼합 시간 스케일 ( $\epsilon/k$ )이 화학 반응 시간 스케일 보다 커서, 난류 혼합 시간 스케일이 지배적인 영역이기 때문인 것으로 보인다.

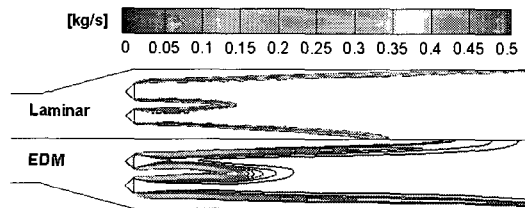


Fig. 7 Comparison of reaction-rate between a laminar chemical reaction (top) and eddy-dissipation model (bottom)

Figure 7은 층류 화학반응 모델(상)과 EDM(하)을 적용한 경우의 화학반응율( $\dot{\omega}$ )을 보여준다. 층류 화학반응의 경우, 경계에서 급격한 반응이 일어나고 명확한 화염면을 보이는 반면, EDM의 경우 화학반응이 다소 느리고 완만한 공간구배를 갖으면서 일어나는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

축대칭 동축형 램제트 연소기에 대한 반응 유동장 해석을 수행하였다. 급확대면이 보염기로 작용하는 연소기와 wedge형 보염기를 장착한 연소기에 대한 해석을 각각 수행한 결과, 연소실로 고속의 공기/연료 혼합물이 유입되기 때문에 급확대 연소기의 경우 potential core가 연소실 내부에서 종료되기 위해서는 연소실 길이가 상당히 길어야 함을 알 수 있었다. Wedge형 보염기를 장착한 연소기는 화염안정을 얻을 수 있었

으며, 보염기의 배열이 적절치 않을 때, 화염안정화가 실패할 가능성이 있음을 알 수 있었다. 난류 연소 모델인 eddy dissipation 모델을 적용해 본 결과, 난류 혼합 시간 스케일이 지배적인 영역에서 화학반응 시간보다 커서 화염면의 각(angle of flame surface)이 작게 나타났다.

#### 참 고 문 헌

1. Gordon E. Jensen, David W. Netzer, "Tactical Missile Propulsion," Vol 170 Progress in Astronautics and Aeronautics, A Volume in the AIAA Tactical Missile Series
2. Yang, Z. and Shih, T. H. (1993), "New Time Scale Based Model for Near Wall Turbulence," AIAA Journal, Vol. 31, pp. 1191~1197
3. Venkateswaran, S., Li, D. and Merkle, C. L. (2003), "Influence of Stagnation Regions on Preconditioned Solutions at Low Speeds," AIAA 2003-435
4. Jack R. Edwards, Meng-Sing Liou, "Low-Diffusional Flux-Splitting Methods for Flows at All Speeds," AIAA Journal, Vol. 36, No. 9, 1998
5. Magnussen, B. F. and Hjertager, B.H., "On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formulation and Combustion," 16th Int'l Symposium on Combustion/The Combustion Institute, 719, 1976
6. J. Lee, D. Fricker, "A Numerical Study of Reacting flow inside Combustors using a Two-equation model of Turbulence and an Eddy-dissipation model of Turbulent Chemistry," AIAA-97-0290, 1997