

램제트 연소기의 보염기 장착에 따른 연소기 특성 변화에 대한 수치적 연구

김성돈*† · 정인석**

Numerical Study on the Coaxial Ramjet Combustor with a Flame Holder

Sung Don Kim*†, In-Seuck Jeung**

ABSTRACT

In IRR(Integral Rocket-Ramjet), the booster is integrated into the ramjet combustor. Such combustors do not contain combustor liners or flame holders within the combustor due to the limited volume and flame stabilization depends on the recirculation zones formed by the sudden expansion region between the inlet duct and the combustor. A numerical study was conducted on the effect of flame holder which could be added to the inlet duct of IRR. Two different types of flame holder installations, flame holder without sudden expansion region and flame holder with small sudden expansion region, were compared and showed different flame shapes and pressure rise in the combustor.

Key Words : ramjet combustor, flame holder, sudden expansion region

1. 서 론

램제트 추진기관은 산화제와 연료의 양을 쉽게 조절할 수 있어서 광범위한 고도와 속도 등 운항 조건에 대해 효율을 극대화시킬 수 있는 장점을 가지고 있으며 고도와 속도 등의 운항조건의 변화 범위가 큰 유도 무기 체제나 고성능, 고효율 유도 무기 체계에 적합한 것으로 평가 받고 있다.

정지추력을 제공할 수 없는 램제트 추진기관의 특성상 램제트 작동에 필요한 속도까지의 가속을 위한 부스터의 장착을 필요로 하고 부스터의 장착 방식에 따라 추진체의 측면 또는 후면에 배치하는 외부 장착형과 램제트 연소기와 부스터용 고체추진체를 동일한 공간에 배치한 일체형으로 구분할 수 있다. 램제트 연소기와 부스터가 통합된 IRR (Integral Rocket-Ramjet) 형태의 램제트 연소기의 경우 제한된 공간으로 인해 연소기 내부에 라이너나 보염기 장착이 불가하며 연소기

전방의 급확산부에 의한 화염 안정화 효과를 얻는 구조로 되어 있다. 이러한 구조의 동축형 램제트 연소기는 연소기 길이와 지름비가 약 4.5 이상에서 효과적인 연소를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.

IRR형의 램제트 추진기관은 부스터 작동시간 중 공기흡입구와 연소기 부를 분할하는 포트커버를 필요로 하며 연소기 내부에 보염기를 장착하는 대신 공기흡입구의 아음속 확산부와 연소기부가 연결되는 포트커버 전방에 보염기를 장착하여 연소기 내의 화염안정화를 기대할 수 있다.

본 연구에서는 동축형의 IRR형 램제트 연소기를 대상으로 2가지 형태의 보염기를 장착에 따른 연소기 특성변화를 살펴보았다. 급확산부가 없는 하나의 보염기를 장착한 경우와 작은 급확산부와 보염기를 동시에 장착한 경우에 대한 수치적 연구를 수행하였으며 연소기 길이와 연료분사는 동일하게 부여하여 화염의 구조 및 연소기 내의 압력 거동을 살펴보았다.

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

† 연락처자, E-mail : scream@plaza.snu.ac.kr

** 서울대학교 기계항공공학부

2. 수치해석적 방법

2.1 기체상의 지배방정식

저 마하수에서 고 마하수까지 다양한 속도분포가 존재하는 램제트 추진기관의 경우 압축성 수치기법에 기반을 둔 예조건화 기법이 널리 사용되고 있다.[1-4] 3차원 유동해석을 위한 지배방정식을 예조건화 행렬을 적용하여 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\int_V \left(\Gamma \frac{\partial Q_v}{\partial \tau} + \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + H \right) dV = \int_V \left(\frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} + H_v + S_g \right) dV$$

S_g 는 난류 모델(SST-DES)과 화학반응 생성항을 나타내며 Q_v 와 예조건화 행렬은 다음과 같이 정의하였다.

$$Q_v = [p, u, v, w, T, k, \omega, Y_j]^T$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \rho_p & 0 & 0 & \rho_T & 0 & 0 & \rho_{Y_k} \\ u\rho_p & 0 & 0 & u\rho_T & 0 & 0 & u\rho_{Y_k} \\ v\rho_p & 0 & 0 & v\rho_T & 0 & 0 & v\rho_{Y_k} \\ H_i\rho_p - 1\rho u\rho v & H_i\rho_T + \rho h_p & 0 & 0 & H_i\rho_{Y_k} + \rho h_{Y_k} \\ k\rho_p & 0 & 0 & k\rho_T & \rho & 0 & k\rho_{Y_k} \\ \omega\rho_p & 0 & 0 & \omega\rho_T & 0 & \rho & \omega\rho_{Y_k} \\ Y_j\rho_p & 0 & 0 & Y_j\rho_T & 0 & 0 & Y_j \end{bmatrix}$$

ρ_p 과 ρ_T 은 고유치를 재조정하는 변수로서 Merkle 등[5]은 다음과 같이 제안하였다.

$$\rho_p = \frac{1}{V_p^2} - \frac{\rho_T(1-\rho h_p)}{\rho h_T}, \quad \rho_T = \rho_T$$

국부적인 cut-off 방법을 이용하면서 수렴성과 수치해의 불안정성을 동시에 고려하기 위해, 인접한 셀의 예조건화 속도 스케일 중에서 최대값을 이용하는 local maximum preconditioning [6,7]을 적용하였으며 점성항이 지배적인 영역에서는 CFL수와 함께 von Neumann 수를 함께 고려한 속도스케일 V_{vis} 를 도입하여 보다 효과적인 수렴성을 확보할 수 있다.[5]

$$V_p^2 = \min[\max(V_{neighbor}, V_{vis}^2), c^2]$$

2.2 화학반응 모델

화학반응은 Jet-A를 연료로 선택하여 1단계 화학식을 고려하였다.[8] 난류연소 모델 EDM (Eddy-Dissipation Model)은 난류에 의한 혼합을 화학반응의 rate-controlling 메커니즘으로 가정하여 화학종의 생성율을 평균 유동변수의 형태로 묘사하는 모델이다. 난류 혼합의 시간 스케일은 에디 특성에 의존하며 난류 운동에너지와 소산의 비로 정의할 수 있다. 본 연구에서는 Magnussen

등에 의한 EDM 모델[9]로 계산된 화학종의 생성율과 Arrhenius 형태의 층류화학반응 모델 값을 비교하여 반응을 지배하는 값을 구하는 방법을 적용하였다.

2.3 수치해석법

공간차분기법으로는 Edwards[10]의 LDFSS (Low-Diffusion Flux Vector Splitting) 기법을 사용하였다. 수치플럭스는 다음과 같이 대류항과 압력항으로 구분되며

$$E_{i,2} = E'_{i,2} + E''_{i,2} = \frac{|\nabla \xi|}{J} \rho_L C \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ u \\ v \\ w \\ H \\ Y_k \end{bmatrix}_L + \frac{|\nabla \xi|}{J} \rho_R C \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ u \\ v \\ w \\ H \\ Y_k \end{bmatrix}_R + \frac{|\nabla \xi|}{J} \rho_{i,2} \begin{bmatrix} 0 \\ \xi'_2 \\ \xi''_2 \\ \xi'_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

예조건화된 수치속은 아래와 같이 정의된다.

$$\tilde{c}_{i,2} = \left(\frac{\sqrt{u^2(1-M_{ref}^2)^2 + 4V_{ref}^2}}{1+M_{ref}^2} \right)_{1/2}$$

지배방정식을 2차 시간 정확도를 가지는 내재적 시간적분을 통하여 해석하기 위해 이중시간전진기법(dual-time stepping)을 적용하였으며 차분된 지배방정식을 계산하기 위해 내재적 차분식은 LU-factorization 기법을 적용하였다.

2.4 연소기 형상 및 조건

연소기 지름은 16cm이며 유입유동은 고도 5km, 마하수 2.5를 선택하였다. 초음속 공기흡입구는 하나의 압축면과 isentropic 압축면이 이어진 구조를 가지며 유입유동을 마하수 1.4까지 압축하도록 하였다. 연료는 기체상으로 가정하여 연소기 전방 20cm 지점에서 당량비 0.8에 해당하는 연료를 분사하도록 하였다. Fig.1에 계산영역과 보염기 형태를 나타내었다. 하나의 보염기만을 사용한 경우(case (a)) 보염기 면적은 연소기 면적의 0.1이고 단면이 정삼각형인 원추 형상이며 노즐 목의 면적은 연소기 면적의 0.3으로 부여하였다. 보염기와 함께 작은 급확산부를 사용한 경우(case (b))는 보염기의 면적비 0.05, 노즐 목의 면적비 0.35로 부여하였다. case (a)의 연소기 유입부 면적비는 0.9, case (b)의 유입부 면적비는 0.5이며 50ms 동안 계산을 수행하였다.

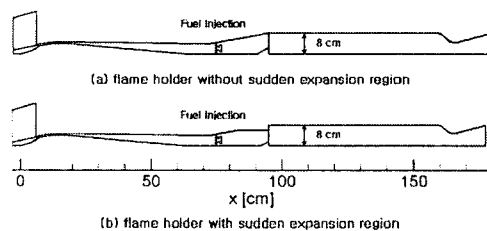


Fig.1 Flame holder installation

3. 결과 및 고찰

3.1 급확산부를 이용한 램제트 연소기

Fig.2는 급확산부를 가지는 램제트 연소기에서의 온도 및 연료 분포를 나타낸 것으로 유입부 면적은 연소기 면적의 0.25이며 유입류 속도는 약 100m/s 정도이다. Fig.2에서 점선으로 표시된 부분은 당량비 0.8에 해당하는 지점을 표현한 것으로 화염이 형성된 영역에서는 당량비 0.8에서 0.87의 비교적 고른 분포를 이루고 있으나 고속 유입유동의 영향으로 상당량의 연료가 연소되지 못하고 배출되는 것을 볼 수 있다. 주어진 형상에서 포텐셜 코어가 연소기 내에서 종료되도록 하기 위해서는 연료분사 위치의 조정이나 길이 연장에 의한 효과를 기대할 수 있으나 본 논문에서는 보염기의 장착에 의한 연소의 활성화를 살펴 보고자 하였다.

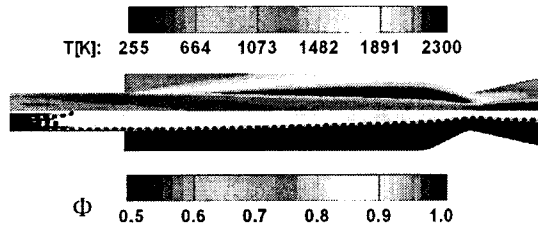


Fig.2 Temperature and equivalence ratio of coaxial combustor with sudden expansion region

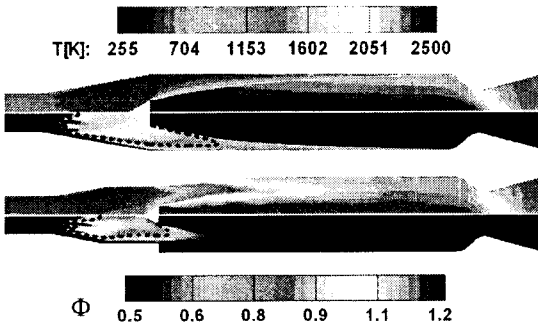


Fig.3 Temperature and equivalence ratio of coaxial combustor with flame holder

3.2 보염기를 이용한 램제트 연소기

Fig.3은 보염기를 장착한 램제트 연소기의 온도 및 연료 분포를 시간 평균한 것이다. 보염기만을 장착한 경우(case(a)) 매우 안정적인 연소과정(Fig.4)을 이루고 있으며 대부분의 연료가 연소를 마친 상태에서 배출되고 있다. 특히 연소기 벽면 전체에서 미연 가스가 존재하여 비교적 저온의

온도 분포를 보이고 있다. 보염기와 함께 작은 급확산부를 장착한 경우(case(b)) 연소기 길이의 중간에서 연소가 종료되는 것을 볼 수 있으나 연소기 내의 압력 진동이 약 200kPa (Fig.4)로 매우 심하게 변동하고 있으며 흡입구 부의 종단 충격파의 위치 변화 또한 크게 나타나는 현상을 보이고 있다. Fig.5의 주파수 분석에서도 볼 수 있듯이 case(b)의 경우 주된 주파수는 176Hz 정도이지만 350Hz와 520Hz 정도의 주파수가 존재하며 1000Hz 이상의 고주파수도 존재함을 볼 수 있다.

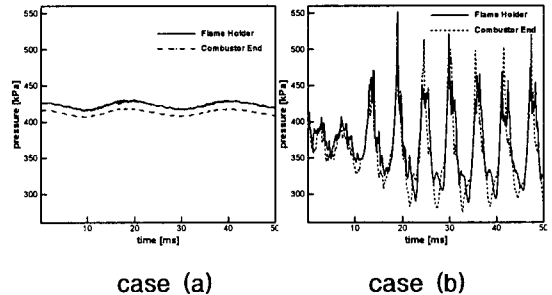


Fig.4 Comparison of pressure histories between case(a) and case(b)

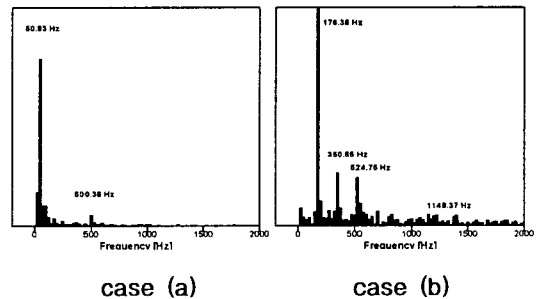


Fig.5 Comparison of frequency of combustor pressure between case(a) and case(b)

Fig.6은 case(b)의 연소기 압력 상승 및 하강에 따른 온도와 압력 분포를 나타낸 것으로 보염기 및 급확산부에서의 연소 과정이 매우 활발하며 이로 인한 연소기 유입부에서의 화염 진동이 매우 심하게 나타남을 볼 수 있다. 특히 보염기 부근에서는 화염의 역류 현상이 나타나고 있다. 급확산부는 부가적인 화염 안정기 역할을 수행하고 있으며 주된 화염안정기로서의 역할은 보염기에 의해 이루어지고 있음을 알 수 있다. Fig.3의 연료 분포에서도 볼 수 있듯이 보염기 주변에 과도한 연료 공급되고 있으며 보염기 주변의 확대부로 인한 유속의 감소로 활발한 연소가 유도되었다. 하지만 약 200kPa의 압력 진동에 의한 화염 진동은 억제되어야 할 부분이며 이는 노즐 목의 면적 변화나 연료 분사부의 위치 변화에 의한 분포 변화와 연료량 감소로 제어될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업(과제번호: M10500000072-05J000007210)의 재정적 지원으로 진행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Venkateswaran, S., Deshpande, M. Merkle, C. L., "The Application of Preconditioning to Reacting Flow Computations", AIAA95-1673
- [2] Shuen, J.-S., Chen, K.-H. and Choi, Y.-H., "A Coupled Implicit Methods for Chemical Non-equilibrium Flows at All Speeds," J. of Computational Physics, Vol. 106, 1993
- [3] Edwards, J. R., Roy, C. J., "Preconditioned Multigrid Methods for Two-Dimensional Combustion Calculation at All Speeds", AIAA J., Vol. 36, No. 2, 1998, pp. 185-192.
- [4] Buelow, P.E.G., Schwer, D.A., Feng, J., Merkle, C.L. and Choi, D., "A Preconditioned Dual-Time, Diagonalized ADI Scheme for Unsteady Computations", AIAA-97-2101, 1997
- [5] S. Venkateswaran, and C.L. Merkle, "Analysis of Preconditioning Methods for the Euler and Navier-Stokes Equations", Von Karman Institute Lecture Series, 1999
- [6] S. Venkateswaran, D. Li, and C.L. Merkle, "Influence of Stagnation Regions on Preconditioned Solutions at Low Speeds", AIAA2003-435, 2003
- [7] H.Ko, S.-C. Jung, W.-S. Yoon, "Evolution of Combusting Flows in Rocket-Ramjet Transition Regime", Proceedings of Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2005
- [8] Amsden, A.A., "KIVA-3: A KIVA Program with Block-Structured Mesh for Complex Geometries", Los Alamos Lab. 1993
- [9] Magnussen, B.F. and Hjertager, B.H., "On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion", Proc. 16th Symposium International on Combustion.
- [10] Edwards, J.R., "Towards Unified CFD Simulation of Real Fluid Flows", AIAA 2001-2524, 2001

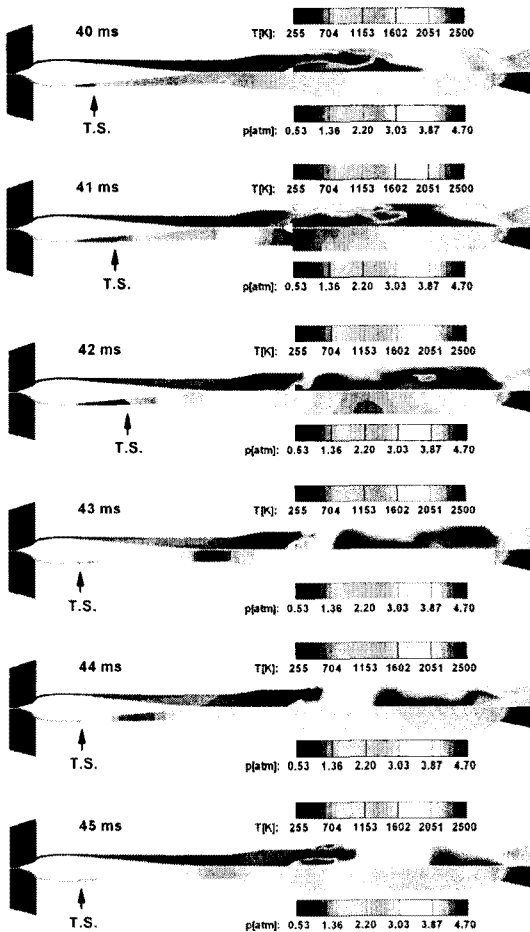


Fig.6 Temperature and pressure contour of case(b)

4. 결 론

본 연구에서는 동축형의 IRR형 램제트 연소기를 대상으로 보염기를 장착에 따른 연소기 특성 변화를 살펴보았다. 보염기에 의한 화염 유지효과는 급확산부에 의한 것보다 매우 효과적임을 확인할 수 있으며 급확산부와 함께 장착할 경우 급격한 연소를 유도할 수 있다. 하지만 이로 인한 연소기 내의 압력 진동이 유도되어 화염의 역류 현상까지 유도될 수 있다. 주된 화염 유지기구로 사용되는 보염기 주변으로의 과도한 연료 공급이 주된 이유로 판단되며 연료 위치 조정에 의한 보염기 주변 연료 분포 조정과 분사 연료량 변화에 의한 효과에 대한 연구를 수행할 예정이다.