

후방단이 있는 모델 초음속연소기의 연소수치해석

문귀원* · 정인석* · 정은주*

Numerical Study on a Model Scramjet Engine with a Backward Step

G.-W. Moon, I.-S. Jeung, E. Jeong

Key Words: 스크램제트 엔진, 초음속 연소

Abstract

A numerical study was carried out to investigate the combustion phenomena in a model Scramjet engine, which had been experimentally studied in the University of Tokyo using a high-enthalpy supersonic wind tunnel. The main airflow was 2.0 in Mach number and the total temperature of hot flow was 1800K. Equivalence ratio was set to be rather higher value of 0.26 than that of experiment to investigate the effect of strong precombustion shock. The results showed that self-ignition occurred at the rear bottom wall of the combustor and combined with the shear layer flame between fuel jet and main airflow. Then, precombustion shock was generated at the step location and reversely enhanced the mixing and combustion process behind the shock. Due to the high equivalence ratio, the precombustion shock moved upstream of the step compared with that of experiment.

기호설명

ER 당량비

T_t 전온도

P_w 연소기 내 윗 벽면 압력

P_t 전압력

* 서울대학교 항공우주공학과

서 론

높은 비행속도를 가지는 차세대 비행체의 실현가능한 엔진으로 스크램제트 엔진이 잘 알려져 있다. 그러나 초음속으로 유입된 공기가 연소실에 잔류하는 시간은 불과 수 ms밖에 되지 않기 때문에 연료-공기 혼합 효율을 높이고 화염을 안정화 시키는 것이 중요한 문제이다. 또한 연소실 내의 유동이 열적으로 질식되는 현상을 피하기 위해 열방출 분포를 제어하는 것이 필요하다. 그런데, 초음속 유동에서의 열방출은, 큰 압력 변화로 인한 유동장 변화와 화학 반응 등으로 인한 레이놀즈 수와 같은 유동 성질의 변화를 통해서 혼합과정에 영향을 미친다. 따라서, 혼합과정에 미치는 열방출에 대한 연구가 필요하다.

이러한 목적으로, 후방단이 있는 초음속 연소기에서의 혼합과정에 미치는 연소의 영향을 연구하기 위해 일본 동경대학(UT : University of Tokyo)에서 실험적 연구가 수행되었다.[1,2] 수소연료는 좀 더 수소-공기 혼합 제어에 적합하고, 추력 손실을 줄이며, 벽면 냉각을 위해 연소실 벽면을 따라 얇은 연료층을 형성시키며 분사된다. 본 연구는 동경대학에서 수행된 실험에 기초하여 연소 전방충격파(precombustion shock)의 형성과 이것이 혼합과 연소과정에 미치는 영향을 살펴보는 데 목적이 있다.

1. 실험 장치

실제의 연소기 입구조건을 재현하기 위

해 UT 모델은 연소기 입구로 습공기가 유입되는 고 엔탈피 초음속 풍동 (high - enthalpy supersonic wind tunnel)을 사용하였다. 수소, 산소, 공기의 혼합기가 가열부로 유입되면 고온의 주유동이 만들어진다. 연소기 입구의 조건으로 주 유동이 1800K 혹은 1000K의 전온도, 0.38Mpa의 전압력, 그리고 마하수 2가 되도록 하였다. 연소기는 높이 36mm, 폭 30mm의 초음속 공기 흡입구와 높이 3mm, 폭 29mm의 후방단이 있는 길이 400mm 사각형 덕트 형상이다. UT 모델의 개략도를 Fig.1에 나타내었다.

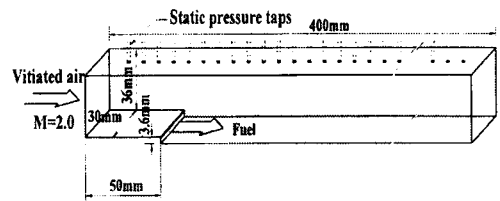


Fig.1 연소기 개략도

연료는 상온의 수소를 사용하여 후방단의 수직 벽면뒤에서 아음속으로 분사됨으로써 수소 연료의 정압력이 주위 주유동의 정압력과 같게 된다. 따라서, 연료의 속도가 당량비 뿐만 아니라 연료 분사시의 출구 압력에 의해 변하게 된다. 벽면 압력을 측정하기 위해 윗 벽면에 압력 센서가 설치되었고, 옆 벽면에는 가시화 장치가 설치하였다.[2]

2. 수치 해법

연소기 내의 화학반응이 있는 초음속 점성 유동장을 해석하기 위하여, 다원 혼

합기체에 관한 2차원 레이놀즈 평균 Navier-Stokes 방정식을 이용하였다. 유동장의 해석을 용이하게 하기 위하여 지배 방정식을 무차원화하고 일반화된 곡선 (ξ, η) 좌표계로 변환하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{J} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial \xi} + \frac{\partial G}{\partial \eta} + \frac{1}{J} H$$

$$= \frac{1}{J} W + \frac{\partial F_v}{\partial \xi} + \frac{\partial G_v}{\partial \eta} + \frac{1}{J} H_v$$

$$Q = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_N \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{bmatrix}, \quad F = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho_1 U \\ \rho_2 U \\ \vdots \\ \rho_N U \\ \rho u U + \xi_x p \\ \rho v U + \xi_y p \\ U(e + p) \end{bmatrix}$$

$$G = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho_1 V \\ \rho_2 V \\ \vdots \\ \rho_N V \\ \rho u V + \eta_x p \\ \rho v V + \eta_y p \\ V(e + p) \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_N \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$F_v = \frac{1}{JRa} \begin{bmatrix} -\rho_1 U_1^d \\ -\rho_2 U_2^d \\ \vdots \\ -\rho_N U_N^d \\ \xi_x \tau_{xx} + \xi_y \tau_{xy} \\ \xi_x \tau_{xy} + \xi_y \tau_{yy} \\ \xi_x \beta_x + \xi_y \beta_y \end{bmatrix}$$

$$G_v = \frac{1}{JRa} \begin{bmatrix} -\rho_1 V_1^d \\ -\rho_2 V_2^d \\ \vdots \\ -\rho_N V_N^d \\ \eta_x \tau_{xx} + \eta_y \tau_{xy} \\ \eta_x \tau_{xy} + \eta_y \tau_{yy} \\ \eta_x \beta_x + \eta_y \beta_y \end{bmatrix}$$

ρ 는 각 화학종의 밀도 ρ_k 의 총합이고, u, v 는 직교 좌표계에서의 속도이다. 총 에너지 e 는 내부에너지와 운동에너지의 합으로 나타낸다. U 와 V 는 곡선 좌표계

에서의 반전 속도이다. $\xi_x, \xi_y, \eta_x, \eta_y, J$ 등은 좌표변환에 쓰이는 값들이다. 압력은 이상기체 상태방정식에 의해 구할 수 있다.

$$P = \sum_{k=1}^N \frac{\rho_k}{M_k} RT$$

여기서, M_k 는 화학종 k 의 분자량이고 R 은 일반기체 상수이다. 온도 T 는 정의된 총 에너지 양으로부터 Newton-Raphson 반복법을 이용하여 구하였다.

수소-공기 혼합기체에 대한 화학반응은 GRI-Mech 2.11에 기반한 25단계-9화학종 상세 반응 모델에 기초하여 사용하였다. 본 연구에서는 연소 반응에 큰 영향을 미치지 않는 N_2 의 해리 반응을 제외하여, $H, H_2, O, O_2, H_2O, OH, H_2O_2$ 및 HO_2 등을 반응성 화학종으로, N_2 를 비활성 기체로 고려한 25단계 화학 반응 모델을 이용하였다. 각 화학종의 비열은 6000K까지 유효한 NASA 다항식을 이용하였다.[4] 각 화학종의 동점성 계수와 열전달 계수는 6000K까지 유효한 온도의 다항식 표현을 인용하였다. 스크램제트 연소기 내의 레이놀즈 수는 매우 높기 때문에 완전 난류 유동으로 가정하였다. 본 연구에서는 섭동이 전단응력 항에 미치는 영향을 고려하기 위해 비교적 간단한 형태의 난류 모델인 Baldwin-Lomax의 대수적 와 점성 모델 (algebraic eddy viscosity model)[5]을 사용하였다. 난류 열전달 계수와 질량 확산 계수를 구하기 위해 난류 Prandtl 수와 난류 Schmidt 수는 각각 0.9로 가정하였다.

연소기 내부의 유동장을 수치적으로 해

석하기 위하여 지배 방정식을 유한 체적법을 이용하여 이산화하였다. 점성항은 중심 차분법을 이용하여 이산화하였다. 대류 플럭스항은 일반 좌표계에서 다원 혼합기체에 대하여 유도된 Roe의 FDS (Flux Difference Splitting) 기법[6]을 사용하여 차분하였고, MUSCL (Monotone Upstream Method for Scalar Conservation Law) 기법[7]을 이용하여 고차의 공간 차분 정확도를 유지하였으며, TVD 성질[7]을 유지하기 위하여 미분형 제한자를 사용하였다. 또한, LU-SGS 기법[8]을 이용하여 완전 내재적인 시간 적분을 수행하였다. 수치적 영역은 340×120 의 격자로 이루어져 있고, 벽면에는 착벽조건과 단열조건을 부과하였다. 외부 유동의 경계 조건으로는 0차의 외삽기법을 이용하였다. 이러한 조건에 대한 동결 유동의 정상상태의 해를 반응 유동의 수치적 계산의 초기조건으로 사용하였다. 실험에서는 고 엔탈피 유동 조건을 얻기 위해 포화된 공기를 사용하였으나, 본 연구에서는 계산을 단순화 하기 위하여 연소기 입구로 유입되는 공기를 건공기로 가정하였다.

3. 결과

3.1 저온 유동 (Cold flow)

Fig.2 (a)는 실험 (ER=0.15)과 수치 계산(ER=0.26)에서 저온유동 ($T_t=1000K$)의 벽면 압력 분포를 나타낸 것이다. 두 경우 모두 낮은 정온도로 인해 자발적 점화가 나타나지 않았다. 따라서, 두 경우가 당량비가 다름에도 불구하고 전체 압력 분포가 평평한 분포를 나타내었다.

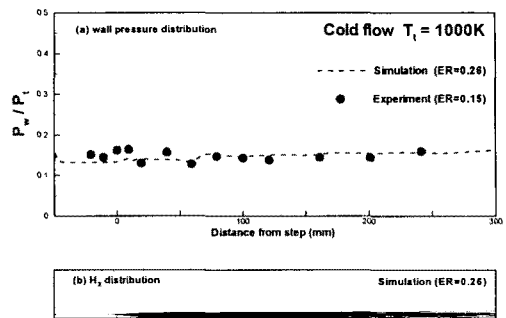


Fig.2 Cold flow의 벽면 압력 분포와 연료 질량분포

Fig.2 (b)은 수치 계산 결과로 H_2 의 질량 분포를 보여주고 있다.

3.2 고온 유동 (Hot flow)

계산 결과 자발 점화가 연소기의 아래 벽면 후미에서 발생한 후 연료 제트와 주 유동사이에서의 화염과 결합되었다. 그 뒤, 화염은 연소기의 후방으로 전파되었고 아래벽면을 따라 일종의 전단층 화염이 형성되었다. 이러한 전단층에서의 열방출은 후방단 뒤쪽의 압력을 증가시키므로 연소 전방 충격파가 단이 있는 위치에서 발생되었다. Fig.3은 강한 연소 전방 충격파의 형성과정을 보여주고 있다. 연소 전방 충격파는 윗 벽면에서 반사되고, 전단층에서의 화염과 상호작용을 일으킨다. 이로 인해 단 뒤 아래 벽면을 따라 역압력 구배가 형성되어 큰 박리 영역이 형성된다. 이 박리 영역은 연료 제트와 주 유동사이의 혼합을 증가시키므로 반응을 더욱 강하게 만든다. 강한 연소로 인해 형성된 높은 압력은 연소 전방 충격파를 지탱하였다.

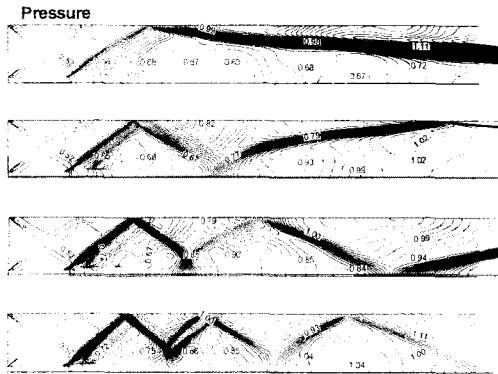


Fig.3 강한 연소 전방 충격파의 형성 과정

Fig.4는 혼합과 연소과정에서의 연소 전방 충격파의 영향을 보여준다. 당량비가 증가함에 따라 강한 연소로 인해 압력은 더욱 증가하게 되고 연소 전방 충격파를 유동 방향의 반대방향으로 이동시킨다. 또한 충격파 뒤의 높은 압력은 연료가 단 위로 흐르게 하고, 여기서 재순환 영역이 발생하였다. 이 영역은 연소 전방 충격파를 강하게 하였고, 이것은 역으로 혼합과 연소를 더욱 강하게 하였다. 연소기 내의 이러한 피드백 과정이 혼합,

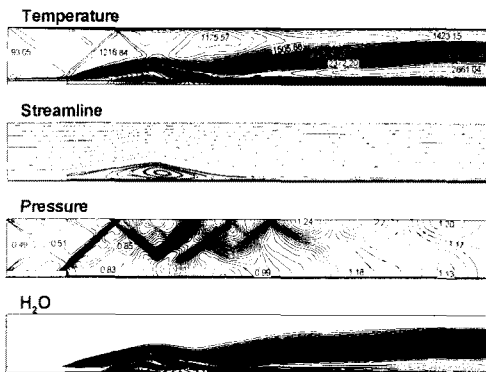


Fig.4 혼합과 연소 과정에서의 연소 전방 충격파의 영향

연소, 충격파 등의 전체 메카니즘을 통제 한다. 그러므로 실험($ER=0.15$)에서의 연소 전방 충격파은 단에 위치하는데 반해, 계산 ($ER=0.26$)의 연소 전방 충격파은 Fig.5 에 보는 바와 같이, 연

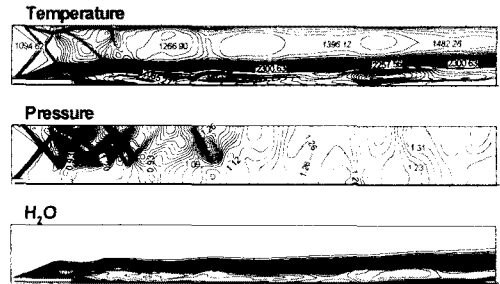


Fig.5 높은 당량비에 의한 연소 전방 충격파의 위치

소기 입구에 위치한다.

Fig.6은 실험 ($ER=0.15$)과 수치 계산 ($ER=0.26$)에서의 고온 유동의 벽면 압력 분포를 나타내고 있다. 수치 계산 결과가 실험 결과에 비해 비교적 상류로 이동하였지만, 전체 분포는 잘 일치함을 알 수 있다. 또한, 수치 계산에서 연소 전방 충격파에 의한 앞의 작은 압력 상승이 윗 벽면의 작은 박리영역에 의해 발생하였는데, 이는 전체 유동장에 대하

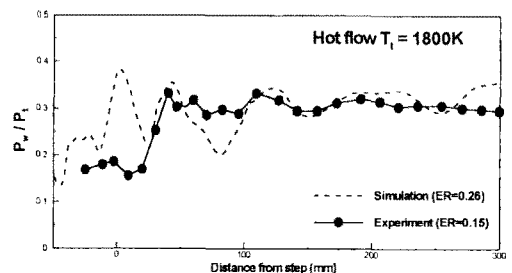


Fig.6 실험과 수치 계산 결과의 벽면 압력 분포 비교

여 그 영향이 미미한 것으로 판단된다.

참고문헌

결론

UT의 모델 스크램제트 엔진 실험 결과에 기초하여 연소 전방 충격파의 형성과이의 혼합과 연소 과정에 미치는 영향을 살펴보기 위해 본 수치 연구를 수행하였다. 강한 연소 전방 충격파의 영향을 살펴보기 위해 당량비를 실험치보다 다소 높은 0.26으로 설정하였다. 수치 계산 결과 전단층에서의 열방출이 후방단 뒤쪽의 압력을 증가시킴으로써 연소 전방 충격파가 단이 있는 위치에서 발생하였다. 연소기 상부 벽면에서 반사된 연소 전방 충격파와 반응면은 상호 작용하여 큰 박리 영역을 생성하였다. 이 박리 영역은 연료 제트와 주 유동사이의 혼합을 증가시켰고, 아울러 연소 반응을 활발하게 하였다. 이로 인해 강력한 연소에 의해 발생된 높은 압력은 연소 전방 충격파를 지탱시켰다. 연소기 내 이러한 피드백 과정이 혼합, 연소, 연소 전방 충격파를 포함하는 전체 메카니즘을 제어한다. 당량비가 증가함에 따라 연소 전방 충격파는 연소기 입구 근처에 위치하였다. 본 연구를 통하여 수치 계산이 실험 결과를 잘 모사할 수 있음을 확인하였다.

후기

본 연구는 1998년도 한국과학재단(98-0200-04-01-3)의 지원금과 2001년도 두뇌한국 21 사업에 의해 연구되었습니다. 본 연구 지원에 감사 드립니다.

1. Tomioka, S., Takahashi, S., Ujiie, Y., and Kono, M., "Interaction between Mixing and Combustion of Slot-Injected Fuel in a Supersonic Combustor" AIAA Paper 95-2447, San Diego, CA, 1995.
2. Takahashi, S., Wakai, K., Tomioka, S., Tsue M., and Kono, M., "Effect of Combustion on flowfield in a Model Scramjet Combustor," Proceedings of the Combustion Institute, vol.27, pp. 2143-2150, 1998.
3. Frenklach, M., Wang, H., Goldenberg, M., Smith, G. P., Golden, D. M., Bowman, C. T., Hanson, R. K., Gardiner, W. C., Lissianski, V., [http:// www.me.berkeley.edu/gri_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/).
4. Gardiner, W.C., Jr., "Combustion Chemistry", Springer-Verlag, NewYork, 1984.
5. Baldwin, B. S., and Lomax, H., "Thin Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flow," AIAA Paper 78-257, Jan. 1978.
6. Roe, P. L., "Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors, and Difference Schemes," Journal of Computational Physics, Vol. 43, pp. 357-372 (1981).
7. Hirsch, C., Numerical Computation of Internal and External Flows, Vol. 2, John Wiley & Sons, New York, 1990.
8. Shuen, S. and Yoon, S., "Numerical Study of Chemically Reacting Flows Using a Lower-Upper Symmetric Successive Overrelaxation Scheme," AIAA Journal, Vol. 27, No. 12, pp. 1752-1760 (1989).