

공동형 보염기를 갖는 모델 스크램제트 엔진의 흡입구 측면효과를 고려한 3차원 통합 유동해석

염효원* · 김성진* · 성홍계** · 강상훈*** · 양수석***

A Unified 3D Numerical Analysis of a Model Scramjet Engine with a Cavity Flame-Holder and Two Intake Side Walls

Hyo-Won Yeom* · Sung-Jin Kim* · Hong-Gye Sung**
· Sanghoon Kang*** · Soosuk Yang***

ABSTRACT

To identify the detailed 3D flow characteristics of a model scramjet engine, a unified 3D numerical analysis was performed. The numerical domain of concern includes the entire flow path of the model scramjet engine extending from the intake to the nozzle exhaust. Turbulent models($k-\omega$ SST and low Reynolds number $k-e$ with Sarkar model) were applied with comparison of experiment result. Intake side wall's effect on flow characteristics was analyzed in view points of flow quality at inlet duct and near the flame holder as well. The code is paralleled with multi-block feature using MPI(Message Passing Interface) library to speed up the 3D calculation.

초 록

모델 스크램제트 엔진의 3차원 유동특성 이해를 위하여 다단의 충격파를 발생 시키는 흡입구부터(외부 유동영역) 공동형 보염기, 연소기, 노즐이 포함되는 엔진 내부 전영역을 통합한 수치해석을 수행하였다. $k-\omega$ SST 난류모델과 Sarkar모델이 적용된 저 레이놀즈 수 $k-e$ 난류모델의 해석결과를 실험 결과와 비교하였으며, 흡입구의 측면효과(intake side wall effects)를 살펴보기 위하여 측면의 유무에 따른 유동특성을 관찰하였다. 본 연구에 소요되는 계산시간의 효율성을 위하여 계산영역을 다중블럭으로 구성하였으며, MPI(Message Passing Interface) 병렬 계산 기법을 적용하였다.

Key Words: Scramjet(스크램제트), Unified 3D Numerical Analysis(3차원통합해석), Intake Side Wall Effects(흡입구 측면효과), Cavity Flame-Holder(공동형 보염기)

1. 서 론

스크램제트 엔진은 극초음속 비행체의 추진을

위한 현실적으로 적합한 엔진으로, 고속의 복잡한 유동구조와 연소과정을 내포하고 있다.

본 연구에서 사용된 동일 모델에 대하여 흡입구 2차원 해석을 입구조건으로 사용하여 3차원 내부 유동영역에서의 연료/공기 혼합 및 연소 특성에 대한 정상 유동 해석이 선행 연구자에 의하여 연구되었다[1]. T.M. Abdel-Salam[2]은 스

* 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

** 종신회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

*** 종신회원, 한국항공우주연구원 첨단추진기관팀

연락처, E-mail: hgsung@kau.ac.kr

스크램제트의 연소에 있어 경계층 두께를 고려한 isolator의 입구조건이 연소기로 들어가는 유동구조 뿐만 아니라 분사되는 연료 분포에도 영향을 미치고 있음을 3차원 수치해석을 통하여 관찰하였다.

본 연구는 스크램제트 엔진에서 발생할 수 있는 다양한 현상들에 대한 정확한 수치적 예측을 위하여 $k-\omega$ SST 모델[3]과 난류 압축성 효과를 고려하는 Sarkar모델이 적용된 저 레이놀즈 수 $k-e$ [4] 혼합모델의 해석결과를 실험 결과와 비교/검증하였다. 또한 흡입구의 측면효과(경계층 두께 성장으로 인한 유동구조 변화 등)를 고려하기 위하여 측면벽을 포함한 모델 스크램제트의 전 영역에 대하여 3차원 통합해석을 수행하였다.

2. 이론 수식 및 수치해법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 3차원 Farve average 된 질량, 운동량, 에너지 방정식을 사용하였으며, 이는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} u_i u_j + \bar{p} \delta_{ij})}{\partial x_j} = \frac{\partial (\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} u''_j u''_i)}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{E}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{E} + \bar{p}) u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} h''_j u''_i)}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{q}_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

여기서 $\bar{\quad}$ 는 시간평균을 $\tilde{\quad}$ 는 질량 가중평균을 나타내며 ρ , u , τ_{ij} , q_j , E 는 각각 밀도, 속도, 점성 응력텐서, 열유속 벡터, 단위 질량당 전에너지(total energy)이다.

2.2 난류모델 및 수치기법

본 연구는 Menter(1993)가 제안한 $k-\omega$ SST 난류모델과 난류의 압축성 효과를 고려하는 Sarkar모델[4]을 Yang & Shih에 의해 제안된 저 레이놀즈수 $k-e$ 난류모델에 적용한 혼합모델을 사용하였다. 낮은 마하수에서 수렴가속을 위해 예조건화 기법을 적용하였으며, 시간적분을 위하

여 LU-SGS (Lower-Upper Symmetric Gauss-Seidel) 기법을 적용하였다. 셀 경계에서 플럭스 계산을 위해 AUSMPW+ 기법을 이용하였고, 유동변수에 대한 MUSCL 외삽 기법을 이용하여 고차의 공간정확도를 갖게 하였다. 이중 시간전진기법 (Dual-time stepping method)을 적용하여 비정상 계산을 수행하였다. 또한 효율적인 계산을 위하여 계산영역을 다중블록으로 구성하였으며, 각 블록마다 MPI(Message Passing Interface) 병렬 계산 기법을 적용하였다.

3. 해석모델 및 계산조건

수치해석을 위하여 고도 31 km, 비행 마하수 7.6, 대기압력 1.040 kPa, 대기온도 224 K를 선정하였다. Figure 1은 모델 스크램제트 엔진의 형상 및 경계조건을 보여준다. 모델 스크램제트 엔진은 혼합압축형 흡입구로 구성되며, 카울은 wedge형이다. 연소기 내 깊이 3 mm, 길이 9 mm의 공동형 보염기가 설치되어 있다.

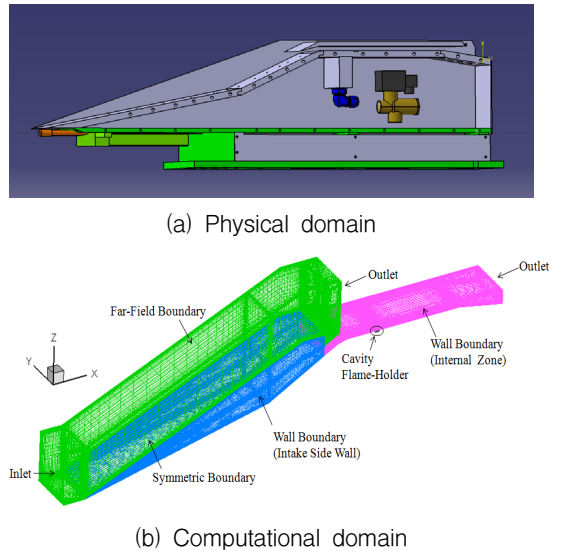


Fig. 1. Schematic of physical model and boundary system

모델 스크램제트 엔진의 전 영역을 계산하기 위하여 9개의 다중블록을 구성하였다. 외부영역 블록 5개 격자점 705,152, 내부영역 블록 4개 격

자점 690,432로 전체 약 1,400,000의 격자점을 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 난류모델에 따른 유동예측

난류모델의 검증을 위하여 Fig. 2에 수치해석과 실험의 압력분포를 비교하였다.

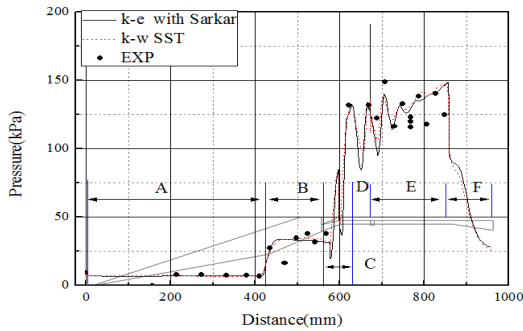


Fig. 2. Static pressure distribution along the lower wall (with two intake side walls)

각 영역의 주요 유동특징은 다음과 같다.

- A-B. 첫 번째, 두 번째 흡입구 충격파
- C-E. 세 번째 램프(ramp)로 인한 corner expansion fans 및 위/아래 벽면에서의 충격파 반사로 인한 압력의 진동
- F. 마지막 충격파 반사 및 유동가속

두 난류모델의 결과는 실험 결과의 압력범위와 충격파 구조를 잘 예측하고 있으나, 연소실 하류에서는 실험 결과와 약 20 kPa의 차이가 발생하였다. 이는 격자의 해상도, 과도한 수치적 소산 또는 실험오차 등의 문제로 야기될 수 있다.

4.2 흡입구 측면효과

흡입구 측면효과를 살펴보기 위하여 측면의 유무에 따른 수치해석을 수행하였다. Figure 3은 측면 흡입구가 있는 경우와 없는 경우에 대한 압력분포(실선: 측면 유, 점선: 측면 무)를 나타내며, Fig. 4, 5는 흡입구(B와 C의 경계) 및 공동형 보염기의 전방(6 mm)에서의 마하수 분포(Y-Z plane)를 보여준다.

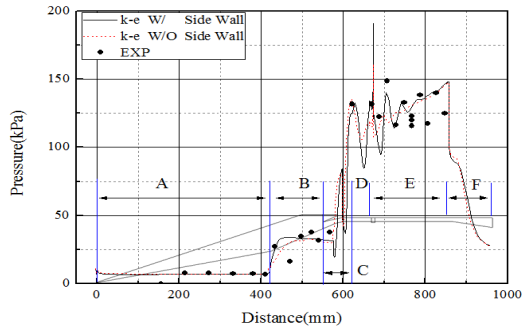


Fig. 3. Static pressure distribution along the wall (with and without intake sidewalls)

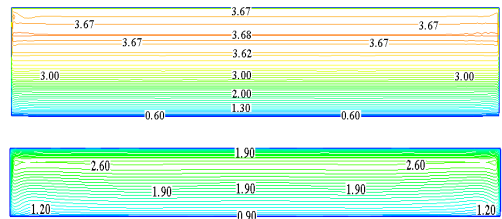


Fig. 4. Mach number distribution at the cowl tip of intake(up) and at immediately upstream of cavity(down) in case of no side wall.

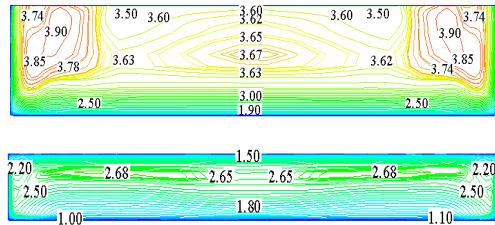


Fig. 5. Mach number distribution at the cowl tip of intake(up) and at immediately upstream of cavity(down) in case of two side walls

흡입구 측면이 없는 경우, 두 번째 램프(ramp)에서 압력이 점진적으로 증가하며(B영역), D영역에서 충격파의 반사로 인한 벽면 근처 유동의 팽창과 압축 시 벽면 압력 변동 범위가 상대적으로 작게 나타난다(Fig. 3). 측면이 있는 경우, 흡입구 측면에서의 유동은 측면이 없을 경우에 비하여 비균질한 복잡한 유동구조를 갖는다(Figs. 4, 5). 측면을 따라 유입된 유동은 유동하류로 진행 될수록 균일해진다(Fig 5). 또한 공동형 보염기 상부에 전단층(shear layer)을 형성하며, 일부는 공동에서 유입 및 유출 되어 질량교환(mass exchange)이 이루어진다(Fig 6).

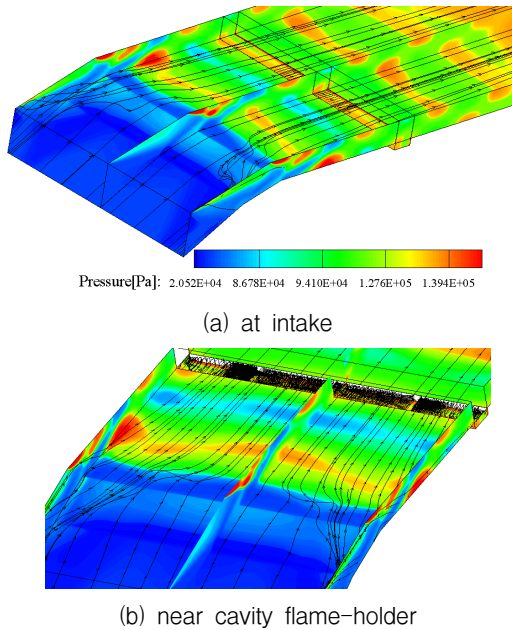


Fig. 6. Stream lines and static pressure contours at the intake and near cavity flame-holder

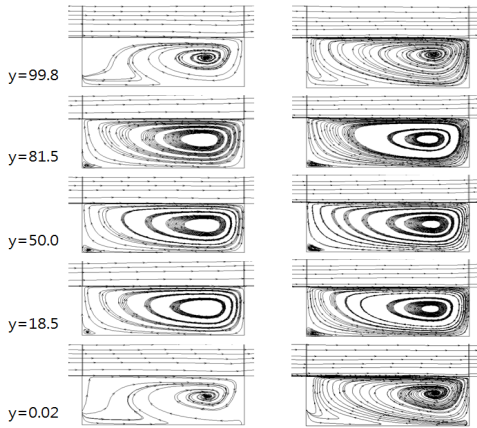


Fig. 7. Stream line distribution in cavity flame-holder : with side wall(left), without side wall(right), (y : mm)

Figure 7은 측면의 유무에 관계없이 전단층이 공동 후면(길이방향으로 하류)과 충돌함으로써 공동 내 와류가 발생하고 있음을 보여준다.

측면이 없을 시, 흡입구의 균일한 유동분포로 인하여 별도의 외란이 없이 vortex가 공동의 전 영역에 걸쳐 균일한 분포를 갖는 반면, 측면이 있을 시, 흡입유동의 측면효과로 인하여 양쪽 측면을 따르던 유동의 일부가 횡방향(y방향)에 대하여 중심위치(y=0.05)로 향한다. 이는 공동 내

vortex를 공동채널의 측면으로부터 중심위치 방향으로 좀 더 집중 시킨다(Fig. 6, 7). 따라서 흡입구 측면효과는 흡입구의 유동구조 뿐만 아니라 보임기 역할을 하는 공동 내 vortex 구조와 연료 혼합에 직접적 영향을 미칠 수 있다.

5. 결 론

모델 스크램제트 엔진의 전 영역에 대하여 $k-\omega$ SST 난류모델과 저 레이놀즈 수 $k-\epsilon$ 난류 혼합모델을 사용한 3차원 수치해석결과를 실험 결과와 비교/검증하였으며, 흡입구 측면의 유무에 따른 효과를 살펴보았다.

흡입구, 보임기, 노즐에서 측정된 압력과 수치해를 비교하여 충격파의 위치와 보임기 주위 유동이 실험결과 유사함을 알 수 있었다. 흡입구 측면에서 발생하는 충격파와 경계층 발달로 인하여 흡입구 측면을 따라 흐르던 유동이 증강으로 방향을 바꿈으로 인하여 보임기 근처에서는 중심에서 강한 와류가 형성되며, 이는 연료 혼합에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서는 흡입구 측면이 있는 스크램제트 해석에 있어서 측면을 고려한 해석이 바람직함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Sebastian Karl, Klaus Hannemann, "CFD Analysis of the HyShot II Scramjet Experiments in the HEG Shock Tunnel," AIAA 15th International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, Dayton, Ohio, 2008, pp. 1-25.
2. T.M.Abdel-Salam, S.N. Tiwari, T.O. Mohieldin, "Three-Dimensional Numerical Study of a Scramjet Combustor," AIAA 40th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, 2002, pp.1-10.
3. 강상훈, 이양지, 양수석 "모델 스크램제트 엔진의 지상시험 결과에 대한 전산해석연구," 한국추진공학회 춘계학술대회, 2008, pp. 328-331.
4. Sarkar, S., Erlebacher, B., Hussaini, M., and Kreiss, H., "The Analysis and Modeling of Dilatational Terms in Compressible Turbulence," Journal of Fluid Mechanics, Vol.227,1991,pp.473~493.