

모델 스크램제트 엔진의 지상시험결과에 대한 전산해석연구

강상훈* · 이양지* · 양수석*

Numerical Investigation about the Ground Test Results of Model Scramjet Engine

Sang Hun Kang* · Yang Ji Lee* · Soo Seok Yang*

ABSTRACT

In order to see the detailed characteristics of model scramjet engine, numerical analysis was performed and compared to the ground test results done by KARI and UQ. Pressure distribution predicted by numerical analysis showed good agreements with test results. Static temperature and pressure distribution explained the mechanisms of cavity flame holder and W-shape cowl which have showed enhancing effects on the supersonic combustion.

초 록

본 연구에서는 모델 스크램제트 엔진의 특성을 자세히 고찰하기 위해 수치해석을 수행하여 실험결과와 비교분석하였다. 수치해석을 통해 예측한 압력분포도는 충격파 터널을 이용한 지상시험과 잘 일치하는 결과를 보였다. 또한 연소기 내부의 정온도 및 정압력분포에 대한 분석에서 공동보염기는 국소적인 고온영역을 발생시키며, W자형 카울은 유동의 가로방향에 대해 압력불균형을 유발시킨다는 특성을 확인하였다. 이러한 특성은 연소기 내부의 초음속 연소를 증진시키는 효과로 이어졌다.

Key Words: Scramjet engine(스크램제트 엔진), Supersonic combustion(초음속 연소), Cavity flame holder (공동 보염기), 수소 연소(Hydrogen combustion), intake(흡입구)

1. 서 론

스크램제트 엔진은 높은 비추력을 유지하면서도 로켓추진기관만이 가졌던 극초음속 영역을 비행할 수 있으며, 재사용이 가능하다는 장점을 갖고 있어 차세대 추진기관으로 주목받고 있다.

2000년대에 들어서면서 각국의 스크램제트 엔진 관련 기술입증프로그램들이 성공을 거두면서, 공기흡입식 고속추진기관에 대한 관심은 날로 높아져가고 있는 실정이다[1-3].

한국항공우주연구원은 2007년 호주 University of Queensland의 HyShot center와 공동으로 T4 충격파터널을 이용한 모델스크램제트 엔진의 지상시험을 수행하였다. 본 연구에서는 시험결과만으로 명확하게 확인할 수 없었던 엔진 내부의

* 한국항공우주연구원 첨단추진기관팀
연락처, E-mail: aeroksh@kari.re.kr

여러 가지 현상을 전산해석을 통하여 보다 자세하게 고찰하고자 한다.

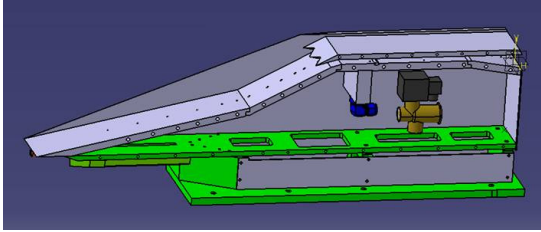


Fig. 1 Layout of model scramjet engine

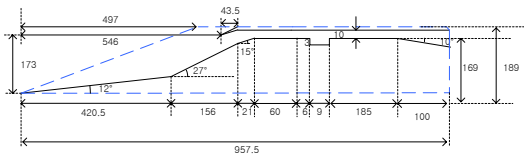


Fig. 2 Model scramjet engine geometry

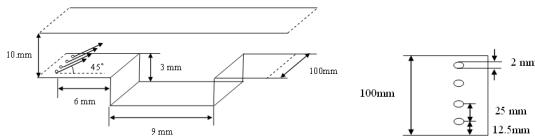


Fig. 3 Cavity flameholder(Left) and fuel injectors(Right)

2. 전산해석의 방법

2.1 엔진 시험모델 형상

지상시험에서 사용된 모델 스크램제트 엔진의 형상은 Fig. 1, 2에 나타난 바와 같다. 흡입구는 이중램프와 카울로 이루어져 있어 4개의 충격파를 이용하여 공기를 압축, 흡입한다. 특히 카울은 흡입구의 시동성향상을 위해 W자형을 적용하였다. 초음속 연소기 내부에는 깊이 3mm, 길이 9mm의 공동이 설치되어 보염기의 역할을 수행한다. 연료는 수소를 사용하였으며 공동 전단에서 4개의 sonic injector를 통해 분사각 45° 각도로 분사되도록 설계하였다. Fig. 3에는 공동 보염기 및 연료인젝터의 형상을 도시하였다. 보다 더 자세한 설계의 방법 및 형상은 본 연구팀의 다른 연구논문에서 확인할 수 있다[4].

2.2 전산해석기법

전산해석은 상용프로그램 Fluent를 사용하였다. 수치해석 기법으로는 Coupled-Implicit Solver를 사용하였고 난류유동장 해석을 위해 $k-\omega$ SST 모델을 적용하였다.

효율적인 분석을 위해 연소기 영역과 흡입구 영역을 나눠서 전산해석을 수행하였다. 연소기는 보다 정확한 입구조건을 모사하기 위해 카울영역을 포함하여 3차원으로 해석하였다. 수소의 연소반응은 9개 화학종, 18단계 반응모델을 사용하였으며 연소기의 벽면조건은 대류에 의한 열유속 조건을 적용하였다. 이때 난류유동에 대한 Local Nusslet number는 다음의 식으로 표현된다[5].

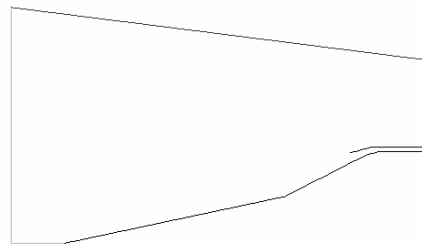
$$Nu_x = St \cdot Re_x \cdot Pr = 0.0296 Re_x^{4/5} Pr^{1/3} \quad (1)$$

, $0.6 < Pr < 60$

주어진 형상, Reynolds 수 및 Prandtl 수로부터 계산된 평균 열전달계수 \bar{h} 는 $1368.5 W/m^2 \cdot K$ 이다.



(a) Combustor



(b) Intake

Fig. 4 Computational domain

Figure 4에는 연소기 및 흡입구 계산영역의 형상을 도시하였다. 연소기의 계산영역은 유동의 대칭성을 고려하여 연소기의 절반에 해당하는 영역만을 해석하였다. 전체적인 격자해상도는 6

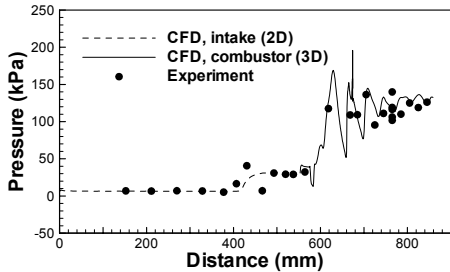
$\times 10^9 \text{ pts/m}^3$ (총 980,000 pts)로서 Boyce 등의 격자계해상도와 동등한 수준이다[6]. 단순한 형상을 갖는 흡입구는 2차원으로 해석하였다. 격자계는 약 60,000 개를 사용하였으며 단일벽면조건을 적용하였다.

연소기 및 흡입구 전산해석의 입구조건은 마하수 7.6 고도 31km 조건에서 수행한 실험데이터 및 이론적 계산을 통해 산출하여 적용하였다.

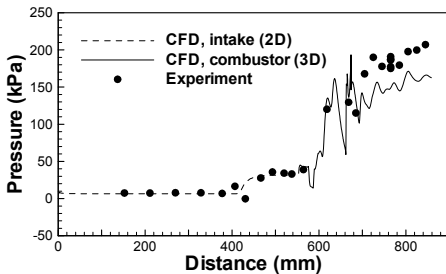
3. 전산해석결과

3.1 실험결과와의 비교

Figure 5에는 기준시험조건에 대해 전산해석결과와 실험결과를 비교하여 도시하였다. 그림에서 점선은 흡입구에 대한 2차원 해석결과를, 실선은 연소기에 대한 3차원 해석결과를 각각 나타내며, 원형 기호는 실험결과를 나타내고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 실험결과와 수치해석결과가 서로 잘 일치하고 있다.



(a) Unfuelled air shot



(b) Fuelled air shot ($\Phi=0.11$)

Fig. 5 Numerical analysis and experimental results comparison for baseline case (Cavity, W-shape cowl)

3.2 공동보염기 및 W자형 카울의 영향

Figure 6에는 연료를 분사한 공기시험 조건 ($\phi=0.11$)에 대해 공동 및 카울의 구성변화에 따른 OH 질량분율분포를 나타냈다. 그림에서 나타난 바와 같이 공동보염기가 있는 경우와 W자형 카울을 적용한 경우가 그렇지 않은 경우보다 더 활발한 연소반응이 일어나고 있어 시험결과와 일치하는 경향성을 나타내고 있다[7].

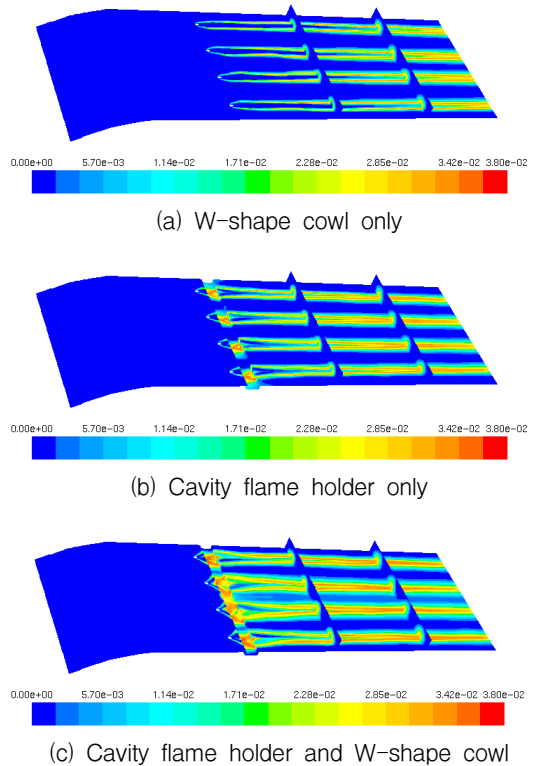


Fig. 6 Distribution of OH mass fraction for various engine configuration

이러한 현상의 원인을 규명하기 위해 Fig. 7에는 무연료 공기시험 조건에서 공동보염기의 유무에 따른 연소기 중심면에서의 정온도 분포를 도시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 공동이 있는 경우에는 공동 내부에 고온영역이 형성됨을 확인할 수 있다. 이러한 국부적인 고온영역은 연소반응을 더 활발하게 하여 초음속 연소의 보

염기의 역할을 수행하는 것으로 판단할 수 있다. Fig. 8에는 무연료 공기시험조건에서 카울형상에 따른 연소기 내부 정압력 분포를 나타냈다. 평면형 카울을 적용하였을 때와 달리 W자형 카울을 적용하였을 때에는 가로방향으로의 압력불균형이 심화되었음을 알 수 있다. 이러한 압력불균형은 연료 및 산화제의 혼합증진을 유발하여 더욱 활발한 연소반응을 일으키게 된다.

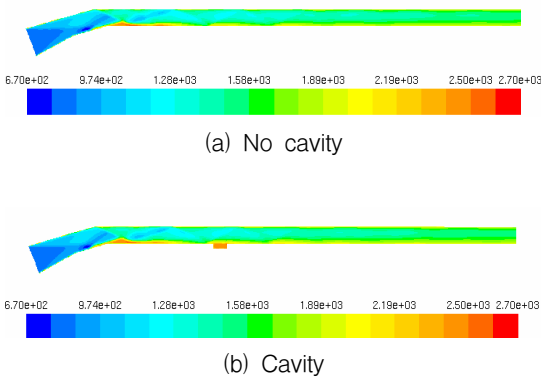


Fig. 7 Static temperature distribution for different cavity configurations

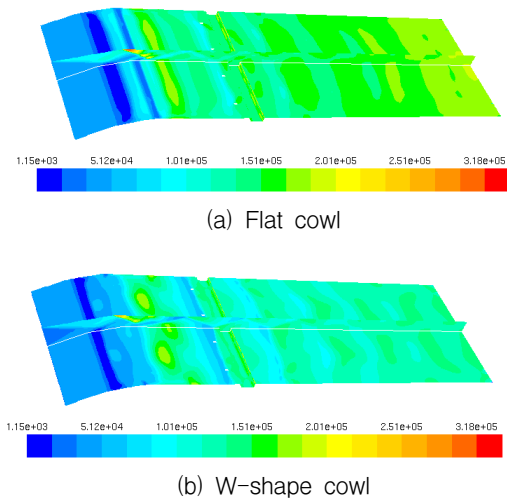


Fig. 8 Static pressure distribution for different cowl configurations

4. 결 론

본 연구에서는 모델 스크램제트 엔진의 지상 시험결과에 대한 정확한 분석을 위해 흡입구와 연소기내부의 반응 및 비반응유동장에 대한 전산해석을 수행하였다. 전산해석을 통해 예측한 압력분포도는 충격파 터널을 이용한 지상시험결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

또한 연소기 내부의 정온도 및 정압력분포에 대한 분석결과로 공동보염기가 국소적인 고온영역을 생성시켜 초음속 연소를 유지하고 활성화시키며, W자형 카울은 유동의 가로방향으로의 압력불균형을 유발하여 연소반응을 증진시킨 것으로 추정할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Kanda, T., Tomioka, S., Ueda, S. and Tani, K., "Design of Sub-Scale Rocket-Ramjet Combined Cycle Engine Model," JAXA-RR-06-009E, 2007
2. J. E. Quinn, "ISTAR: PROJECT STATUS AND GROUND TEST ENGINE DESIGN," AIAA Paper 2003-5235, 2003
3. 원수희, 정인석, 최정열, "극초음속 스크램제트 엔진 개발의 개관," 한국추진공학회지 제 9권, 제 1호, 2005, pp. 67-83
4. 강상훈, 이양지, 양수석, "지상시험용 모델 스크램제트 엔진의 설계," 한국추진공학회지 제 11권, 제 5호, 2007, pp. 1-13
5. Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th ed., John Wiley & Sons Inc., 1996
6. Boyce, R. R., Gerard, S. and Paull, A., "The HyShot scramjet flight experiment flight data and CFD calculations compared," AIAA Paper 2003-7029, 2003
7. 강상훈, 이양지, 양수석, "충격파 터널시험을 통한 스크램제트 엔진의 초음속 연소현상연구," 한국추진공학회 춘계학술대회, 2008