



소형 터보제트엔진 연소기의 2차원 전산유체해석 모델

이 세 민,¹ 박 수 형,² 이 창 진,² 이 동 훈,³ 팽 기 석,³ 류 종 혁,⁴ 유 경 원⁵

A TWO-DIMENSIONAL CFD MODEL OF SMALL TURBOJET COMBUSTOR

Semin Lee,¹ Soo Hyung Park,² Changjin Lee,² Donghun Lee,³ Kiseok Paeng,³
Jong Hyeok Ryu⁴ and Kyung-Won Ryu⁵

A practical modeling approach of a small slinger combustor is proposed and a 2-dimensional axisymmetric computational model is developed. Based on numerical results from the full 3-dimensional configuration, model reduction is achieved toward 2-dimensional axisymmetric configuration. By simplifying the complex model, computing time can be significantly reduced and it makes easy to find effects of geometry modification. Numerical results show that the flow characteristic of 2-D model is quite similar to that of the 3-D configuration.

Key Words : 슬링거 연소기(Slinger Combustor), 정상유동(Steady Flow)

1. 서 론

무인항공기(UAV), 헬리콥터 보조 추진장치 등 항공기의 소형 경량화 추세에 따라 소형 가스터빈 엔진의 시장이 확대되고 있다. 소형 엔진의 경우 연소실 크기의 제한으로 인한 연소효율 및 연소유지 등의 어려움을 해결하기 위한 방법으로 연소실내의 혼합특성을 높이는 방향으로 연구가 진행되어 왔다. Fig. 1에서와 같이 압축기(compressor)와 디퓨저(diffuser)를 지난 고압 고속의 유동은 크게 3가지 경로로 연소실로 유입된다. 복잡한 유입류로 인하여 연소실내에 와류(vortex)가 발생된다. 연소실내의 와류는 높은 연소성능과 연소 유지에 중요한 역할을 한다. 따라서 여러 곳에 위치한 유입구를 통해 유입되는 유량의 정확한 예측과 강한 와류를 발생시키기 위한 유입구의 위치, 연소실 형상 등은 연소기 설계 시 중요하게 고려되어야 하며 연소기 내부 유동특성에 대한 정확한 해석이 수행되어야 한다[1-3].

Lee[1]등은 연소가 일어나지 않는 정상상태(steady state) 해석을 수행하였다. 연소기 내부 유동장에서 연소과정이 유동 특성에 강한 영향을 미치지 않으나 연소가 일어나지 않는 조건에서의 유동특성이 연소 시에도 유지된다는 가정을 하였다. 이러한 CFD 해석을 통하여 연소기 내부의 주요 유동 현상을 전산유체해석을 통해 예측할 수 있다.

초기 설계 단계에서 3차원 전체 형상에 대한 전산유체해석은 격자생성과 계산시간의 측면에서 비실용적이다. 설계 과정에서는 연소를 배제한 cold flow 해석을 수행하여 성능에 영향을 미치는 형상변수를 도출하기 위한 효율적인 계산모델이 절실하다. 3차원 전체형상의 기하학적 비대칭성을 반영한 2차원 축대칭 모델은 설계과정의 시간과 비용을 크게 줄일 수 있을 것이다. 본 연구에서는 개발단계에 있는 연소기를 대상으로 계산시간이 많이 소요되는 3차원 전체형상에 대한 해석을 대체할 수 있는 2차원 축대칭 모델을 개발하였다. 최종적으로 구성된 2차원 축대칭 모델을 이용해 전압(total pressure) 손실과 각 공기동의 유량분포를 예측하였다.

2. 수치해석기법 및 모델링 과정

2.1 수치기법

본 연구에서는 CFD-ACE 코드를 이용하여 계산을 수행하였다. 기본 난류모델은 k-ε 모델이며 난류세기(turbulence

1 학생회원, 건국대학교 대학원 항공우주정보시스템공학과

2 정회원, 건국대학교 항공우주정보시스템공학과

3 정회원, 삼성테크윈(주) 파워시스템연구소

4 정회원, 경원테크(주)

5 정회원, 국방과학연구소

* Corresponding author E-mail: pish@konkuk.ac.kr

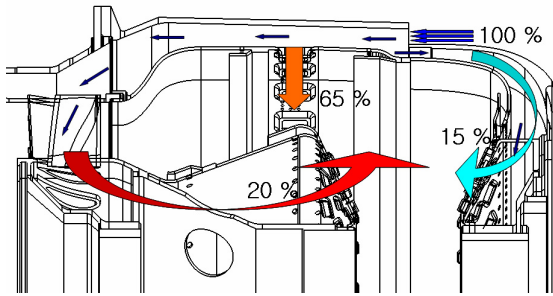


Fig. 1 Schematic of a slinger combustor

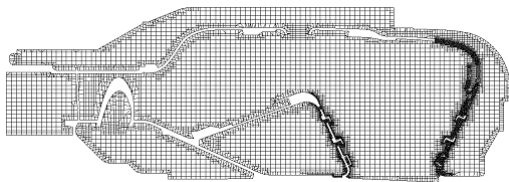


Fig. 2 3-dimensional Cartesian mesh

intensity)는 5%로 가정하였다. 공간정확도는 2차 정확도의 upwind 방법을 사용하였다. 속도와 난류방정식은 예조건화된 Conjugate Gradient Squared 방법으로 반복 계산하여 정상 해를 구하고, 압력장은 AMG(Algebraic Multi Grid)방법을 적용하였다. CFD-ACE의 여러 난류모델과 수치기법을 최종형상에 대해 적용해 수치기법의 영향을 살펴본 결과 압력손실과 유량 분포에서는 거의 차이가 없었음을 확인하였다.

2.2 격자구성

3차원 전체형상에 대한 직교격자(Fig. 2)를 구성하였고 3차원 입구영역 해석(Fig. 3 좌)과 2차원 모델(Fig. 3 우, Fig. 4) 해석 시에는 정렬격자를 구성하였다. 격자수는 각각 node point를 기준으로 620만개, 40만개, 2만개, 30만개이다. 격자밀도로 인한 차이를 방지하기 위하여 최초 전체형상 계산시의 격자수를 유지하여 계산하였고 최종 구성된 2차원 모델에 대하여 Grid Convergence Test를 수행하여 적절한 격자수를 결정하였다.

2.3 유동조건 및 경계조건

디퓨저를 지난 유동은 마하수 0.3의 크기로 30도의 경사각을 갖고 연소기 입구를 통해 유입된다. 입구에서의 유동조건은 Table 1과 같다.

경계조건으로는 주어진 질량유량을 입구 단면적에 수직인 방향으로 설정하였고 출구조건으로 압력을 고정하였다. 2차원 모델의 경우 CFD-ACE 매뉴얼에 따라 입구 유량을 환산하였

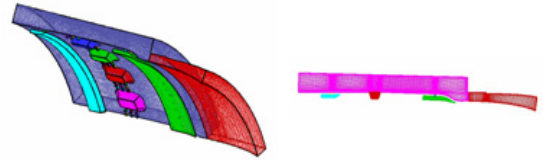


Fig. 3 Structured meshes for inlet region(left: 3D, right: 2D)

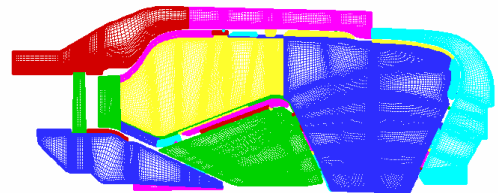


Fig. 4 Two-dimensional model

다[5]. 주어진 입구 정압을 찾을 때까지 출구압력을 변경하는 방법으로 반복계산을 수행하였다.

2.4 모델링 과정

구성하고자 하는 2차원 축대칭 모델은 3차원 형상이 갖는 각 공기공의 유량분포와 연소실 내부 유동특성을 잘 묘사하여야 한다. 축대칭(axisymmetric) 모델을 구성하기 위하여 실제 모델의 축 대칭화 과정을 수행하였다. 이를 위해 연소기 형상에서 축대칭이 아닌 부분에 대한 형상분석이 선행되었다.

주공기공, Hollow vane, Swirl Tab과 작은 공기공 등 연소실내부로 유입되는 각 공기공 등의 총면적을 계산하여 축과의 거리를 고려하여 2차원 모델을 구성하는 방법으로 진행하였다. 주공기공을 제외한 축 대칭화 과정이 필요한 부분들은 축에 대하여 수직이거나 일정한 각도를 갖는다. 주공기공의 경우에는 벽면을 타고 들어가는 입구부분을 실제 면적으로 환산하였을시 동일한 유량 비를 구할 수 없었다. 이로 인해 다른 부분과 달리 출구부분의 면적은 동일하게 유지하고 벽면과 주공기공이 시작되는 부분의 면적을 조정하는 방법으로 동일한 유량비를 갖는 모델을 구성할 수 있었다.

연소실 전방 공기공들의 Swirl Tab은 축에 수직인 방향으로 구성하였다. 또한 실제 유동조건에서의 Swirl 영향이 유량

Table 1 Inlet flow condition

Inlet condition	value
air mass flow	1.036 kg/s
Mach number	0.3
total pressure	492.42 kPa
static pressure	468.80 kPa
total temperature	510.71 K
swirl angle	30 deg

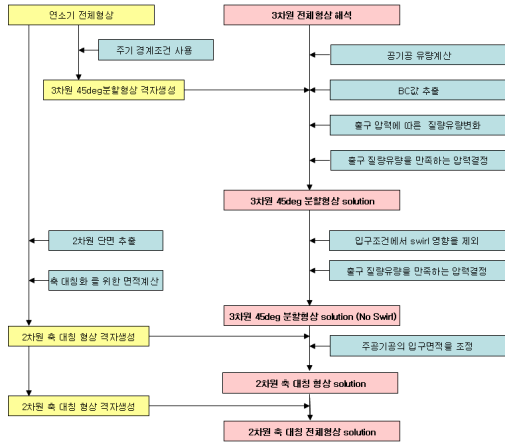


Fig. 5 Modeling procedure

분포와 전압 차에 큰 영향을 주지 못함을 45도 분할형상 해석결과를 통해 확인할 수 있었다. 이것은 Swirl의 영향을 고려할 수 없는 2차원 모델이 전압손실과 유량분포의 측면에서 타당한 결과를 제시할 수 있음을 의미한다. Fig. 5에서 확인할 수 있듯 3차원 해석 결과와 동일한 유량분포와 입구 압력 값을 갖는 조건을 만족할 때까지 계산을 반복하였다.

3. 해석결과

3.1 3차원 전체형상과 2차원 축대칭 모델의 결과비교

3차원 해석결과와 비교하였을 때 속도분포의 경우 매우 유사한 결과를 나타낸다. 주공기공 전방의 하나의 큰 vortex와 두 개의 작은 vortex가 존재함을 확인하였다. 모델링 과정에서 swirl tab의 방향을 축 방향으로 수정하였던 것과 Swirl의 영향을 무시하였던 점을 고려할 때 Fig. 6에서 비교된 두 경우에서 보여지는 속도의 방향과 크기 등은 매우 유사하다고 판단된다.

Table 2는 최종 구성한 2차원 축대칭 모델을 이용하여 계산한 유량분포를 나타낸다. 각공기공들로부터 연소실로 유입되는 유량의 입구대비 값을 비교해 보면 참고문헌의 값과 거의 같음을 확인할 수 있다.

Fig. 7에서 Vane을 통해 공기가 연소실로 들어오는 과정에서 발생하는 와류는 불필요한 전압손실을 유발하는 것으로 판단된다. Table 3에서 2차원 축대칭 모델 해석 결과 값이 실

Table 2 Mass flow rate

	입구유량 대비(%)		
	주공기공	역류영역	Hollow vane
2차원 모델	65.4	16	18.6
reference	65	15	20

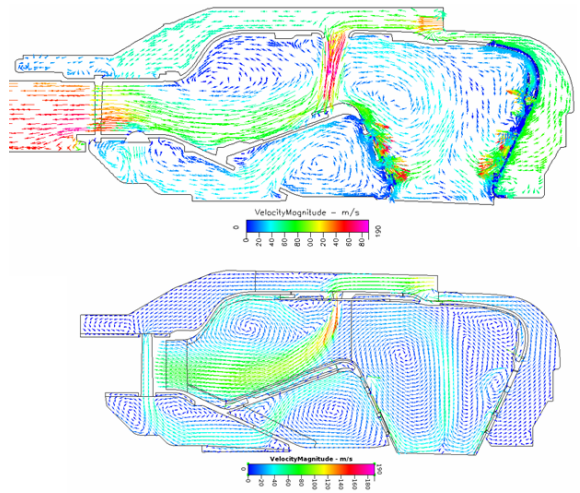


Fig. 6 Velocity distributions (upper: 3D, lower:2D)

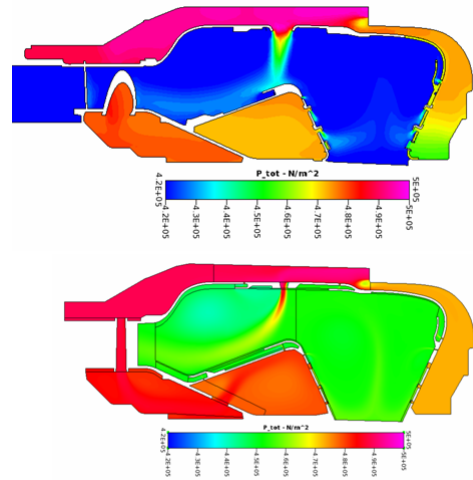


Fig. 7 Total pressure distributions (upper: 3D, lower:2D)

험을 통해 구한 값 11.5%와 비교하였을 때 유사함을 알 수 있다. 계산모델의 결과가 실험결과에 비해 작은 전압손실을 나타내는 것은 모델링 과정에서 부득이하게 고려할 수 없었던 swirl 효과와 Swirl Tab으로 인한 전압손실을 고려치 않았기 때문이라 생각된다.

결론적으로 연소기 내부 속도와 전압분포, 유량분포 등의 결과를 종합하면 앞서 구한 2차원 축대칭 모델은 3차원 모델을 대신할 수 있는 타당한 모델이라 할 수 있다.

3.2 2차원 축대칭 모델을 이용한 해석

주공기공의 위치 변화에 따른 변화를 보고자 기준 위치(A)에서 입구방향(B)과 vane방향(C)으로 위치를 변화시켜서 해석

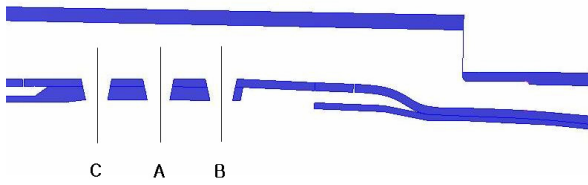


Fig. 8 Location of main air hole

하였다. 주공기공의 위치변화는 Fig. 9와 같다. 주공기공이 입구에서 멀어질 경우 전압손실이 조금 더 크게 발생하였다. 전체적으로는 두 경우의 위치변화 범위 내에서 주공기공의 위치변화가 주는 연소기 내부 유동특성은 민감하지 않음을 알 수 있었다.

4. 결론 및 향후계획

본 논문에서는 CFD-ACE를 이용하여 초소형 터보제트엔진 연소기의 cold flow 해석을 수행하여 3차원 형상의 유동특성을 잘 모사하는 2차원 축대칭 모델을 구성하였다. 2차원 축대칭 모델의 해석결과 실제 연소기를 모델로 한 실험에서 얻은 값과 유사한 결과를 얻었다. 본 연구에서 구성한 2차원 축대칭 모델은 연소기 내부의 주요형상변화에 대한 내부유동특성을 고려하는데 있어 3차원 형상을 해석하는 것에 비해 시간적 경제적으로 큰 이점이 있고 개발단계에서 성능예측에 활용

Table 3 Total pressure loss

	입구와 출구의 전압 차(%)
2차원 모델	9.8
Experiment	11.2

Table 4 Mass flow rate

	입구유량 대비(%)		
	주공기공	역류영역	Hollow vane
Case B	65.3	16.2	18.5
Case C	65.4	16.2	18.4

Table 5 Total pressure loss

	입구와 출구의 전압 차(%)
Case B	9.5
Case C	10.1

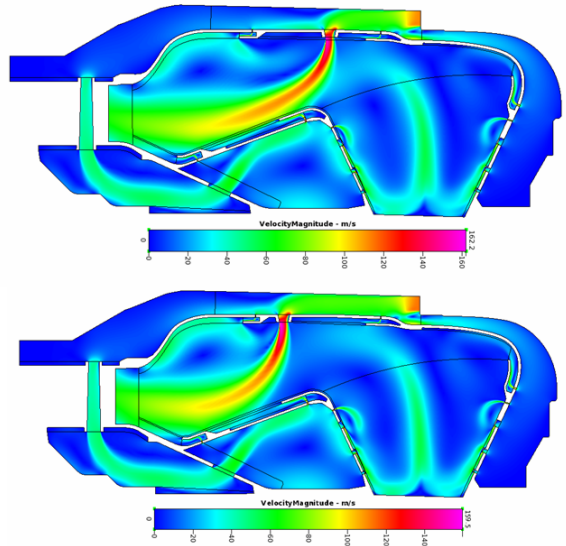


Fig. 9 Velocity distributions (upper: Case B, lower: Case C)

될 수 있을 것으로 판단된다. 향후 2차원 축대칭 모델을 이용하여 주공기공의 면적 또는 연소실 내부 공기공의 위치 등의 설계변수 연구를 통해 연소기의 성능개선 방향을 모색하고자 한다.

후 기

본 연구는 삼성테크윈 파워시스템연구소 "초소형터보제트 엔진 유동해석" 연구 결과 중 일부이며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 1990, Lee, D. Yeh, C. Tsuei, Y. Jiag, W. and Chung, Y., "Numerical Simulation of Gas Turbine Combustor Flows," *AIAA 90-2305*.
- [2] 1990, Huebner, S. and Exley, T., "Numerical Analysis of The Flows In Annular Slinger Combustors," *AIAA 90-2164*.
- [3] 1990, Melconan, J.O., Mostafa, A.A. and Nguyen, H.L., "Introducing the VRT Gas Turbine Combustor," *AIAA 90-2452*.
- [4] 2006, 최성만, 이강엽, 이동훈, 박정배, "가스터빈 슬링거 연소기 실험연구," *한국항공우주학회지* 제34권, 제2호, pp.68-74.
- [5] *CFD-ACE Manual*, <http://www.kw-tech.co.kr>, pp.6-84.