

초음속 유동장에서 기저 분출 유동의 대와류 난류 모사

신재렬* · 원수희** · 최정열***

Hybrid RANS/LES simulation of Base-Bleed in Supersonic Flows

Jae-Ryul Shin* · Su-Hee Won** · Jeong-Yeol Choi***

ABSTRACT

The purpose of this study is analysis of flow field where is around of injector of supersonic combustor which is bluff-body stabilized flame and hyper-mixer type of supersonic combustor injector by using hydrogen or hydrocarbon fuel. Various schemes are evaluated to supersonic backward step flow filed with massive separation region in validation step. Compounded scheme of 5th-order TVD-MUSCL, Roe FDS, S-A DES/DDES has a good performance in base and base-bleed flow.

초 록

본 연구의 목적은 수소 및 탄화수소를 이용한 bluff-body 화염 안정화 및 hyper-mixer와 같은 초음속 연소기 연료 분사기 주변의 유동해석 이다. 대규모 박리영역을 갖는 후방단 형상의 초음속 주변 유동을 해석하기 위한 검증 단계로 다양한 수치기법을 평가해 보았다. 고차 공간 정확도로 확장된 5차 TVD-MUSCL기법, Roe FDS, S-A DES/DDES 조합이 기저유동과 기저유출 유동에 좋은 결과를 보여 주었다.

Key Words: RANS, LES, DES, Base-Bleed(기저유출), Base Flow(기저유동), Supersonic(초음속), Turbulence Model(난류모델)

1. 서 론

스크램젯 엔진에서 연소는 초음속에서 매우 짧은 체류시간 동안 발생한다. 초음속 연소를 하

기위해 연료-공기 혼합이 빨리 진행되어야 하고 전압소실이 작아야 효율적인 운영이 가능 한다. 초음속 연소기에 충격파는 무시될 수 없다. 그러나 이 충격파가 경사충격파가 되면, 전압력소실은 크지 않다. 그래서 경사충격파는 향상된 연료-공기 혼합 및 화염안정화에 긍정적인 영향을 줄 수 있다[1]. 초음속 연소기 연료분사 방법에는 주 유동과 수직, 수평, 경사로 연료를 분사는 방법이 있다. 그리고 연소기 및 분사기의 형태에

* 부산대학교 일반대학원

** 서울대학교 항공우주공학과

*** 부산대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail: aerochoi@pusan.ac.kr

따라 cavity, 다양한 ramp형태, strut형태, hyper-mixer등이 있다. 모든 형태의 분사기는 주유동에 수직/수평 할 수 있지만 후방단을 가진다. 본 연구의 목적은 수소 및 탄화수소를 이용한 bluff-body 화염 안정화 및 hyper-mixer와 같은 초음속 연소기 연료 분사기 주변의 유동해석에 있다. 특히, Bluff-body와 hyper-mixer는 동이 후방단을 가지고 주유동에 대해 평행하게 연료를 분사한다. 이들 유동의 후방단에서 주유동과 연료유동 사이에 두 개의 재순환 영역이 발생한다. 이 재순환 영역은 주유동과 연료유동 사이의 속도차이에 의해서 만들어진다. 본 연구는 초음속 연소유동장 해석에 앞서 후방단 유동의 비정상해석을 통해 유동의 특징을 이해하고자 한다.

2. 유동장 모델

2.1 지배방정식

Navier-Stokes 방정식 및 난류전달방정식을 완전 결합된 형태로 보존형 벡터식으로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(E-E_v)}{\partial x} + \frac{\partial(F-F_v)}{\partial y} + \frac{\partial(G-G_v)}{\partial z} = 0$$

$$Q = [\rho, \rho u, \rho v, \rho w, e, \rho \nu]^T$$

여기에서 Q는 보존변수 순서쌍, E, F, G 그리고 E_v , F_v , G_v 는 각방향의 비 점성 및 점성 플럭스 벡터이다.

난류 모델로는 대규모 박리가 존재하는 유동에서 좋은 결과를 보여 주고 있는 DES 모델중에 Spalart-Allmaras (S-A) DES[2]/DDES[3] 모델을 사용하였다. 이 모델은 Spalart[4]에 의해 발표된 S-A 일방정식 모델을 기초로 하고 있다.

2.2 수치해석기법

지배방정식을 유한체적법을 이용하여 이산화하였다. 대류 플럭스항은 일반 좌표계에서 Roe

의 FDS 기법을 사용하여 차분하였으며, 5차 MUSCL기법 및 5차 WENO기법을 이용하여 고차의 공간차분 정확도를 유지하였고, TVD 성질을 유지하기 위해 제한자를 사용하였다. 차분된 방정식은 완전 내재적기법을 이용하여 시간 적분 하였다. 선형화된 방정식은 LU-SGS반복법과 이중 시간 기법을 사용하였다.

3. 계산결과 및 해석

3.1 격자 및 경계조건

실린더의 길이는 Mathur and Dutton[5]의 실험에서 실린더 끝단에서의 경계층 두께, 번위 두께, 운동량 두께 및 표면마찰계수를 난류 모델을 이용해 정상상태 유동해석 결과로부터 $8R_0$ 로 결정하였다. Forsythe et al.[6]의 계산 격자에서와 같이 직경방향에 대해 $4.15R_0$ 로 취하고, 유동 하류 부분은 $10R_0$ 로 취했다. Fig. 1은 기저유동 격자를 나타낸다. 초기격자 간격은 유동 물리량 중 운동량 두께와 일치하는 $y^+ < 2$ 로 잡았다. 성긴 격자는 34만개이고 중간 격자는 160만개 그리고 조밀 격자는 320만개 이다. 실린더의 벽은 no-slip 단열벽을 적용하고, 입구 및 출구는 외삽 조건을 적용했다.

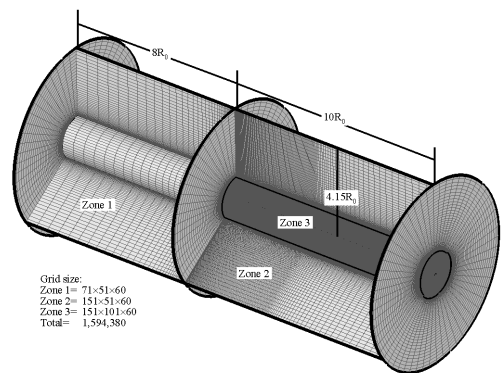


Fig. 1 Computational Grid (Middle Grid: 1.6×10^6)

기저유출의 경우, 무차원화 유출계수 I 와 유출 마하수는 다음과 같이 정의 된다.

$$I = \frac{\dot{m}}{\rho_{\infty} u_{\infty} A_b}$$

$$M_{bc}^2 = \frac{1}{\gamma - 1} \left[-1 + \sqrt{1 + 2(\gamma - 1) \frac{T_{0bc}}{T_{\infty}} \left(\frac{IM_{\infty} P_{\infty} A_b}{P_{bc} A_{bc}} \right)^2} \right]$$

3.2 기저유동

기저면 1mm 앞의 실린더 벽면에서 경계층내의 속도분포가 실험 및 이전 전산결과와 잘 일치하는 것을 Fig. 2에서 알 수 있다.

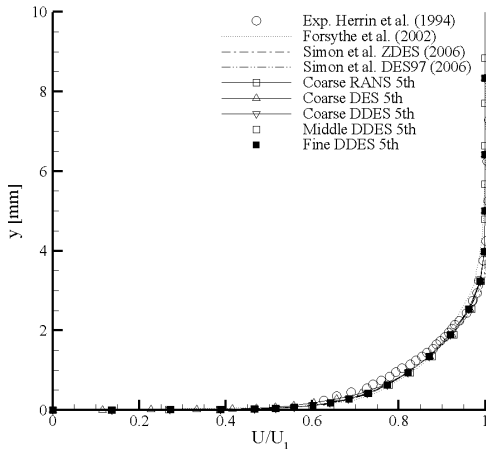


Fig. 2 Velocity profile at 1mm prior

Fig. 3에서 기저면 압력분포를 계산한 결과 성긴격자의 5차 TVD-MUSCL RANS와 3차 TVD-MUSCL DDES의 결과 보다 5차 TVD-MUSCL DES/DDES가 좋은 성능을 보여 준다. 특히, 성긴격자에서 5차 TVD-MUSCL DES가 실험값에 저평가 되지만 잘 따라가고 있다. 그리고 격자가 증가함에 따라 중간격자는 다른 전산결과와 유사하게 실험값에 비해 과평가 하고 있다.

Fig. 4의 기저면 하류유동의 속도분포에서 재순환영역 안쪽의 속도분포는 성긴격자의 5차 TVD-MUSCL결과와 실험결과가 잘 일치 하였다. 그러나 재부착점 이후로 다른 전산결과와 같이 실험과 일치 하지 않았다. 특히, Simon et al.의 ZDES는 재부착점 이후의 속도 분포를 잘 예측 했으나 재순환 영역에는 3차 TVD-MUSCL DDES와 유사한 결과를 보여 주었다.

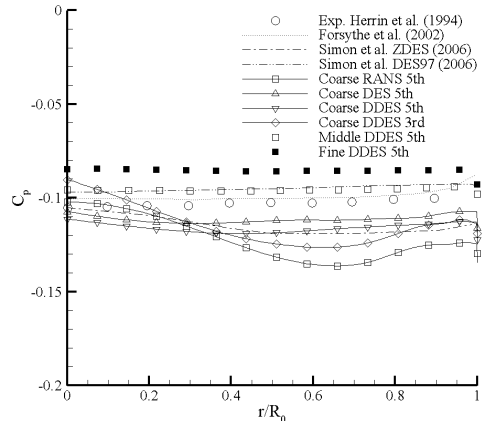


Fig. 2 Base pressure distribution

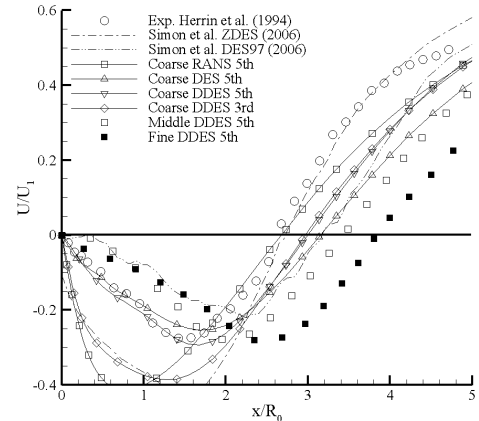


Fig. 4 Velocity profile along axis

3.3 기저유출유동

기저유동에서 축방향 속도 분포를 잘 예측하는 DDES 모델, Roe FDS, 5차 TVD-MUSCL 조합을 기저유동에서 사용된 격자를 이용하여 기저유출 유동을 해석하였다. 유출 출구에서 유출 속도를 실험과 이전 전산결과를 비교한 Fig. 5에서 성긴격자와 중간격자의 유출 속도가 다른 전산 결과에 비해 실험과 잘 일치함을 알 수 있다. 이를 통해 주어진 경계조건이 잘 맞음을 알 수 있다.

Fig. 6의 기저 유출이 있는 경우 기저면의 압력분포는 기저유동 검증과 같은 경향을 보여 주었다. 중간격자는 다소 과평가를 하는 반면 성긴 격자는 실험과 잘 일치함을 보여 준다.

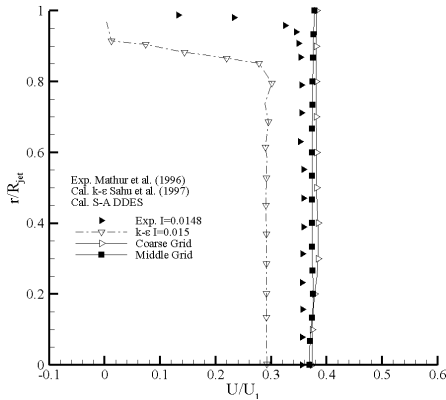


Fig. 5 Axial velocity distributions at orifice exit

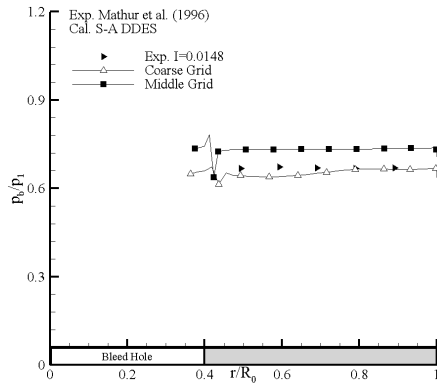


Fig. 6 Averaged base pressure ratio

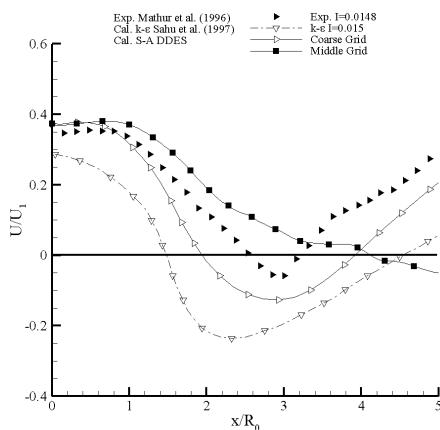


Fig. 7 Velocity distribution along axis

Fig. 7 기저면 후방 축방향 속도 분포에서 실험에 성긴/중간 격자가 이전 전산 결과에 비해

재순환영역 안쪽에서는 비교적 실험결과를 잘 따라 가나 성긴격자는 저평가하고 중간격자는 과평가를 하고 있음을 보여 준다. 그러나 이 경우 모든 전산결과가 재 부착점 이후에서는 실험을 잘 따라가지 못하는 것을 알 수 있다.

4. 결론 및 고찰

대규모 박리영역을 갖는 후방단 형상의 초음속 연소기의 분사기 주변 유동을 해석하기 위한 검증 단계로 다양한 수치기법을 평가해 보았다. 고차 공간 정확도로 확장된 TVD-MUSCL법과 WENO법, 플럭스 기법으로 Roe와 AUSMDV, 그리고 난류 모델에서 S-A, S-A DES, S-A DDES를 기저유동에 적용하여 계산을 수행하였다. 기저 유동의 기저 압력 분포와 기저면 하류의 속도 분포를 실험과 비교한 결과 재순환 영역내의 속도 분포에서 Roe FDS, 5차 TVD-MUSCL, S-A DDES 조합이 가장 좋은 결과를 보여 주었다. 그리고 기저 압력 분포에서는 Roe FDS, 5차 TVD-MUSCL, S-A DES 조합이 좋은 결과를 보여 주었다. 이를 바탕으로 기저 유출 계수 $I=0.0148$ 경우 유출 출구의 속도 분포를 잘 예측함을 알 수 있었다. 기저면 압력분포는 기저유동 결과와 유사한 경향성을 보여 준다. 격자수가 많으면 과평가 하고 적으면 저평가하는 경향을 보여 주었다.

참고 문헌

1. J.-H. Kim, Y. Yoon, C.-W. Park, and J.-W. Hahn, "The Characteristic Modes and Structures of Bluff-Body Stabilized Flames in Supersonic Coflow Air," Combustion and Flame, accepted, 2004.
2. M., Spalart, P. R., Strelets, M., Travin, A., "Detached-eddy simulation of an airfoil at high angle of attack," Elsevier, pp. 24 - 26, 1999.