기저부 유동 및 난류가 다단 로켓의 단 분리 운동에 미치는 영향

고 순 흠,[1] 김 재 관,[1] 한 상 호,[1] 김 진 호,[1] 김 종 암[*2]

EFFECT OF BASE FLOW AND TURBULENCE ON THE SEPARATION MOTION OF STRAP-ON ROCKET BOOSTERS

S.H. Ko,[1] J.K. Kim,[1] S.H. Han,[1] J.H. Kim[1] and C. Kim[*2]

Turbulent flow analysis is conducted around the multi-stage launch vehicle including base region and detachment motion of strap-on boosters due to resultant aerodynamic forces and gravity is simulated. Aerodynamic solution procedure is coupled with rigid body dynamics for the prediction of separation behavior. An overset mesh technique is adopted to achieve maximum efficiency in simulating relative motion of bodies and various turbulence models are implemented on the flow solver to predict the aerodynamic forces accurately. At first, some preliminary studies are conducted to show the importance of base flow for the exact prediction of detachment motion and to find the most suitable turbulence model for the simulation of launch vehicle configurations. And then, developed solver is applied to the simulation of KSR-III, a three-stage sounding rocket researched in Korea. From the analyses, after-body flowfield strongly affects the separation motions of strap-on boosters. Negative pitching moment at initial stage is gradually recovered and a strap-on finally results in a safe separation, while fore-body analysis shows collision phenomena between core rocket and booster. And a slight variation of motion is observed from the comparison between inviscid and turbulent analyses. Change of separation trajectory based on viscous effects is just a few percent and therefore, inviscid analysis is sufficient for the simulation of separation motion if the study is focused only on the movement of strap-ons.

Key Words : 보조 부스터(Strap-on Rocket Boosters), 단 분리 운동(Separation Motion), 겹침 격자 기법(Overset Mesh Technique), 기저부 유동(Base Flow), k-ω SST 난류 모델(k-ω SST Turbulence Model), Spalart-Allmaras 난류 모델(Spalart- Allmaras Turbulence Model), KSR-III, Titan-IV

1. 서 론

오랜 기간에 걸쳐 보조 부스터를 포함하는 다단 로켓의 공력 및 운동 특성에 대한 해석이 진행되어 왔다.[1,2,3] 초기의 많은 연구들이 다단 로켓 형상의 정상 상태에서의 유동 해석과 그 공력 특성에 초점을 맞춘 가운데 몇몇 연구자들은 실험 연구와 병행하여 실험 연구를 통해 제공되는 로켓의 단 분리시 분리 궤적 정보를 바탕으로 분리 과정에서의 물리적인 유동 특성과 시간에 따른 공력의 변화를 해석하였고, 이후 공력 해석과 운동 방정식의 연계를 통한 단 분리 전 과정의 완전한 수치해석 모사가 이루어졌다. 그럼에도 불구하고 여전히 연구 과정의 미흡함은 존재한다. 일단 단 분리 전 과정에 대한 수치해석시 소요되는 막대한 계산 시간으로 인해 궤적 예측을 실험치에 전적으로 의존하거나 혹은 기저부 유동에 대한 분석은 제외한 채 로켓의 전두부(forebody) 해석만으로 운동을 예측하는 연구들이 진행되어 왔다. 그런데 전두부의 유동만을 해석하는 방식은 단 분리에 따라 주 로켓의 몸체 아래로 낙하하는 부스터의 밑단 영역의 압력 분포를 고려할 수 없다는 점에서 정확한 운동 해석 결과를 제공할 수 없다는 단점을 가진다. 또한, 현재까지는 난류 유동에 따른 발사체의 운동 변화에 대한 연구가 제대로 제시되지 않고 있다.

이에 본 연구에서는 로켓의 기저부 영역을 포함한 전 유동 영역에 대하여 다단 로켓 주위의 난류 유동 해석을 수행하고

1 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부
2 정회원, 서울대학교 기계항공공학부
* Corresponding author, E-mail: sslee@abc.ac.kr

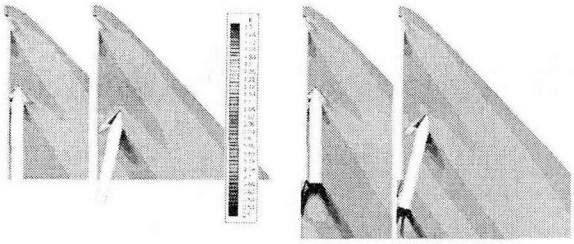

Fig. 1 Separation Motion of a Simplified Launch Vehicle Configuration

이에 따른 부스터의 분리 운동을 시뮬레이션하였다. 로켓의 단 분리 운동 모사를 위한 해석자로는 공력 해석과 강체 운동을 연계하고 겹침 격자 기법을 적용한 해석자가 사용되었으며, k-ω SST 2방정식 난류 모델[4]과 Spalart-Allmaras 1방정식 난류 모델[5]을 활용한 해석 과정을 포함함으로써 로켓 해석을 위한 최적의 난류 모델을 찾고자 하였다. 개발된 해석자는 한국항공우주연구원에서 연구한 KSR-III 응용형 형상 해석에 적용하여 기저부 유동 및 난류에 따른 단 분리 운동 변화를 고찰하였다. 본 해석을 통해 기저부 유동 영역의 고려에 따라 단 분리 운동 양상이 크게 변함을 관찰할 수 있었고, 난류 유동 현상의 경우 실제 단 분리 운동 궤적에는 큰 변화를 주지는 않음을 확인할 수 있었다.

2. 지배방정식 및 수치기법

압축성 Navier-Stokes 방정식을 3차원 x, y, z 직교 좌표계에서 무차원화된 보존형 벡터 형식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial E}{\partial x}+\frac{\partial F}{\partial y}+\frac{\partial G}{\partial z}= \frac{1}{Ra}\left[\frac{\partial E_v}{\partial x}+\frac{\partial F_v}{\partial y}+\frac{\partial G_v}{\partial z}\right] \quad (1)$$

여기서 Q는 보존 변수를 의미하고, E, F, G는 비점성 플럭스 벡터, Ev, Fv, Gv는 점성 플럭스 벡터를 의미한다.

정확한 난류 유동 해석을 위해 k-ω SST 및 Spalart-Allmaras 난류 모델이 사용되었으며, 비정상 유동 해석을 위해서는 Dual Time Stepping 기법이 활용되었다. 또한, 공간 이산화 방법은 AUSMPW+ (modified Advection Upstream Splitting Method Press-based Weight function)[6] 기법이, 시간 적분 방법은 LU-SGS (Lower-Upper Symmetric Gauss-Seidel)[7] 기법이 활용되었다.

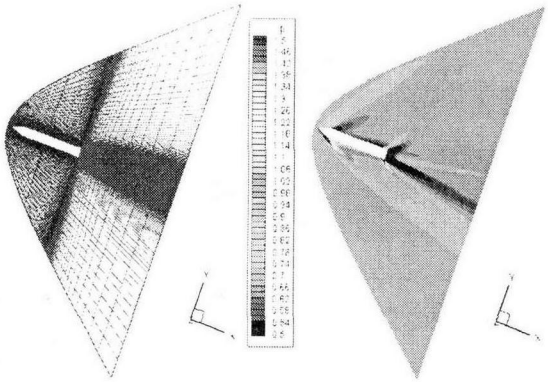

Fig. 2 A Two-block Mesh and Pressure Contour around a Standalone Booster of KSR-III

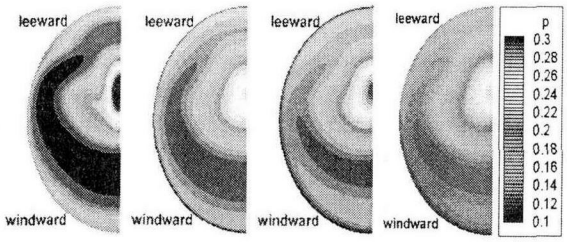

Fig. 3 Pressure Contour on the Base Plane (Invisicd / S-A / k-ω SST + Comp. / k-ω SST)

동역학 모델링을 위하여는 6자유도 강체 운동 방정식을 적용하였으며, 특정 단계에서의 공력 해석 결과로부터 몸체의 속도를 구하고, 이로부터 궤적 변화를 추출하였다.

마지막으로 격자 기법은 겹침 격자 기법을 활용하였다. 현재의 형상이 주 로켓과 부스터의 두 개의 몸체를 포함하기 때문에 각 몸체 주위에 Multiblock으로 구성된 격자들을 형성하고 이들을 최종적으로 연계하여 해석하도록 하였다.

3. 연구 결과

3.1 Prelimary Studies

초기 연구로서 단순화된 다단 로켓 형상에 대해 기저부 유동에 의한 운동 변화 양상을 관찰하였다. 해석에 활용된 형상은 본 단 분리 운동 연구와 동일한 KSR-III 응용형 형상으로 하되, 핀과 스커트 부를 삭제함으로써 몸체의 밑단에서 복잡한 유동이 나타나지 않는 경우 전두부 형상만을 해석하는 연구 방식의 정확도를 확인하고자 하였다.

Fig. 1에 몸체의 운동에 따른 유동장 변화가 제시되어 있다. Fig. 1의 압력 분포도는 주 로켓과 부스터간 간격이 0.2일 때의 유동 분포이다. 그림을 통해 부스터의 전두부 근처에 몸

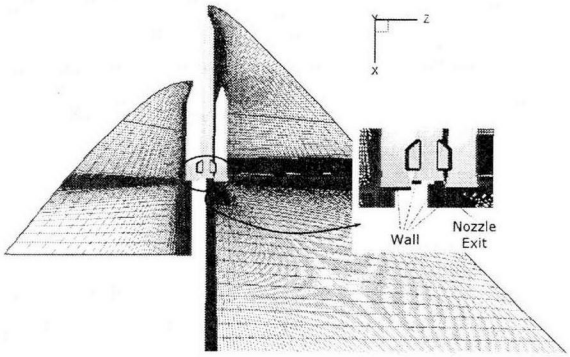

Fig. 4 An Overlapping Mesh and Boundary Conditions at the Base Plane

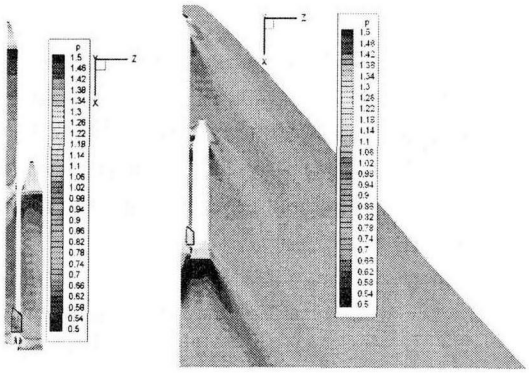

Fig. 5 The Pressure Contour on and around KSR-Ⅲ

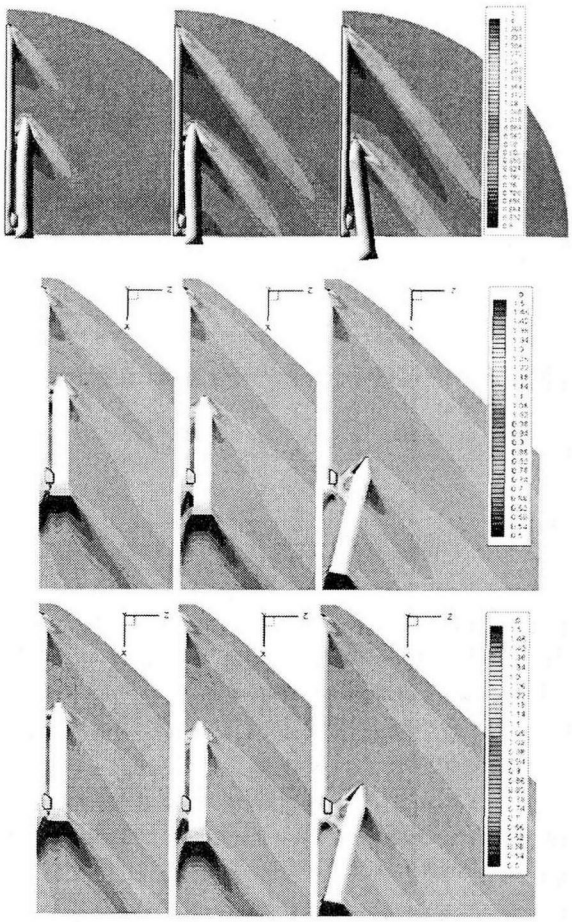

Fig. 6 Separation Analyses of KSR-Ⅲ (Fore-body / Inviscid / Turbulent)

체간 간섭에 의한 압력 증가가 강하게 나타남을 확인할 수 있으며, 주 로켓을 벗어나는 부스터 기저부 근처로 강한 팽창류가 관찰된다. 이로부터 실제 단 분리 궤적을 관찰하면, 부스터의 기저부에서의 강한 팽창류와 이에 따른 압력 강하로 인해 기저부의 압력을 자유류의 압력으로 가정하는 전두부 해석에 비해 빠른 단 분리 현상을 보이게 되며, 주 로켓의 기저부에서 발생하는 팽창파가 부스터의 밑단에 영향을 줌에 따라 부스터에 작용하는 Normal Force는 감소하고 모멘트는 더 강화되는 현상을 나타낸다.

다음으로, Fig. 2 및 3에는 KSR-Ⅲ의 단일 부스터 형상[8]에 대한 공력 해석 결과를 제시한다. 본 연구를 위해 k-ω SST 및 Sparalt-Allmaras의 두 난류 모델이 사용되었으며, 각 난류 모델을 사용한 경우의 공력 특성을 비점성 유동 해석 결과와 비교함으로써 난류 현상에 의한 공력 특성 변화 정도를 파악하였다. 우선 Fig. 2에는 해석에 사용된 격자계 및 유동 해석 결과가 제시되어 있다. 본 해석을 위해 사용된 격자계는 전두부 영역을 따라 91×37×121개의 격자점을 가지고, 기저부 영역이 55×37×201개의 격자점으로 이루어져 있는 Multiblock 격자계이다. 유동 마하수는 참고문헌 11의 결과와 동일하게 마하수 1.6으로 주었고, 레이놀즈 수는 1.683×107이다. Fig. 2에 나타난 해석 결과는 받음각이 20도이고 k-ω SST 모델을 사용하였을 때의 유동 분포이다.

난류 유동 해석에 따른 공력 특성 변화를 관찰하기 위해 Fig. 3에서와 같이 기저부 근처의 압력 분포를 살펴보았다. 물리적으로 판단할 때, 기저부에서는 유동의 박리가 일어나므로 받음각이 없다면 기저부 전 영역에 걸쳐 압력이 균일하게 나타나야 할 것이다. 본 결과를 살펴보면, 비점성 해석일 때의 Stagnation Point를 따른 압력 증가에 비해 난류 해석에서 압력 상승이 적게 나타나는 것을 알 수 있으며, 이는 난류 현상에 의한 Mixing이 일어나 유동을 좀 더 균일하게 분포시키는 것임을 알 수 있다. 한편, 압축성 효과를 고려했을 때 오히려 압력 구배가 더 보이는 것을 알 수 있는데, 이는 참고문헌 [9]에서 언급된 바와 동일한 현상으로, 기저부 해석을 위해서는 오히려 압축성 효과가 부정적 영향을 미침을 알 수 있다.

3.2 Separation Dynamics of KSR-III

개발된 해석자를 활용하여 KSR-III 발사체의 단 분리 해석을 수행하였다. 단 분리시의 유동 조건을 따라 마하수 1.7 및 레이놀즈수 1.431×107의 조건을 적용하였고, 해석 편의성을 위해 비행 각도는 90도로 고정하였다. Fig. 4 및 5에는 각각 본 해석에 사용된 격자계 및 정상 상태에서의 유동 해석 결과가 제시되어 있다. 우선 격자계는 겹침 격자로, 주 로켓은 총 4개의 블록으로 구성되어 있으며, 부스터는 총 2개의 블록으로 구성되어 있다. 총 격자수는 약 350만 개이며, 주 로켓의 기저부에서는 노즐로부터 분출류가 방출되는 것으로 경계조건을 구성하였다. 한편, 정상 상태의 해석으로부터 부스터의 운동에 영향을 미치는 주요 물리적 요소는 부스터의 궁형 충격파에 의한 반사파와 주 로켓의 핀 및 스커트로부터의 경사 충격파 및 주 로켓의 기저부에서 발생하는 팽창류인 것을 확인할 수 있다. 이 중 궁형 충격파는 부스터의 하강 속도 증가 및 양의 모멘트 발생을 야기하며, 경사 충격파는 주로 음의 모멘트를 증가시키게 된다. 그리고 팽창류는 경사 충격파에 의한 영향을 상쇄시키는 역할을 한다. 그리고 이러한 현상들은 부스터가 초기에 반시계방향으로 회전하도록 작용한다.

최종적으로 KSR-III의 단 분리 시뮬레이션이 수행되었다. 기저부 유동을 고려했을 때의 결과 및 난류 모델을 추가했을 때의 결과가 각각 비교되었으며, 이들 결과는 Fig. 6에 제시되어 있다. 우선 기저부 유동을 고려한 경우 전두부 해석만을 수행한 경우와 큰 차이를 나타내는데, 이는 주 로켓의 핀과 스커트에서 발생한 경사충격파의 영향이 단 분리 과정의 진행에 따라 약해지고, 동시에 주 로켓의 기저부의 팽창류가 이들의 영향을 완화시킴에 따라 부스터의 모멘트가 증가하기 때문이다. 이와 같은 영향은 주 로켓의 영역 바깥으로 나가버림으로써 초기의 강한 경사충격파의 영향이 유지되는 전두부 해석에서는 확인할 수 없었던 현상이다. 한편, 난류 해석의 결과는 비점성 해석에서와 거의 동일한 결과를 나타낸다. 실제 난류 해석에 의해 부스터의 기저부 압력 저하는 명백히 나타나나, 동시에 주 로켓의 경사충격파에 의한 압력 증가도 난류 해석에서는 적게 나타난다. 즉, 부스터의 스커트 부에서의 압력 증가가 적기 때문에 기본적으로 전두부에서 축력이 작아지게 되며, 결국 이러한 두 현상이 서로 상쇄 효과를 나타내어 단 분리 궤적의 차이가 거의 없도록 하게 된다.

4. 결 론

유동 해석자와 강체운동 방정식을 연계하고 난류 모델을 적용함으로써 다단 로켓의 부스터 분리시 운동 궤적을 모사하였다. 기저부 유동에 의한 영향과 난류 영향을 중점적으로 살펴본 본 연구를 통해 기저부 유동 해석은 주 로켓의 경사충격파의 영향을 주 로켓의 기저부 팽창류가 상쇄시킴으로써 전두부 해석과 큰 차이를 보임을 확인하였으며, 난류 해석은 부스터의 기저부 압력 강하가 주 로켓의 경사충격파의 영향 감소와 상쇄됨으로써 비점성 해석과 유사한 결과를 보임을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 서울대학교 BK-21 기계분야 사업단의 지원과 한국과학기술정보연구원의 '제6차 전략과제 지원'을 통한 조금원 박사의 자문을 통해 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌

[1] S. Taylor and J.C.T. Wang, 1996, "Launch-Vehicle Simulations Using a Concurrent, Implicit Navier-Stokes Solver," *AIAA J. of Spacecraft and Rockets*, Vol.33, No.5.

[2] R.L. Meakin and N.E. Suhs, 1989, "Unsteady Aerodynamic Simulation of Multiple Bodies in Relative Motion," *AIAA 89-1996-CP.*

[3] S.J. Choi, C. Kim, O.H. Rho, and J.J. Park, 2002, "Numerical Analysis on Separation Dynamics of Strap-On Boosters in the Atmosphere," *AIAA J. of Spacecraft and Rockets*, Vol.39, No.3, pp.439-446.

[4] F.R. Menter, 1994, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journal*, Vol.32, No.8, pp.1598-1605.

[5] P.R. Spalart and S.R. Allmaras, 1992, "A one-equation turbulence model for aerodynamic flows," *AIAA Paper 92-0439.*

[6] K.H. Kim, C. Kim and O.H. Rho, 1998, "Accurate Computations of Hypersonic Flows Using AUSMPW+ Scheme and Shock-aligned-grid Technique," *AIAA Paper 98-2442.*

[7] S. Yoon and A. Jameson, 2004, "Lower-Upper Symmetric - Gauss-Seidel Method for the Euler and Navier-Stokes Equations," *AIAA Journal*, Vol.26, No.9, pp.1025-1026.

[8] H. Ok, I. Kim, S.H. Ra, S.W. Choi, B.S. Oh and J. Lee, 2004, "Determination of the Separation Forces of the Strap-on Boosters," *AIAA Paper 2004-874.*

[9] S.H. Park, S. Acharya and J.H. Kwon, 2005, "An Improved Formulation of k-ε Turbulence Models for Supersonic Base Flow," *AIAA Paper 2005-4707.*