

화염유도로 주위의 3 차원 초음속 제트 유동 해석

박승경* · 최봉근* · 윤경택* · 우유철* · 이대성** · 강선일**

Three Dimensional Supersonic Jet Flow Analysis Impinging on Flame Deflector Surface

S. K. Park, B. K. Choi, K. T. Yoon, Y. C. Woo, D. S. Lee, S. I. Kang

Key Words : Three Dimensional Compressible Flow (3 차원 압축성 유동), Impinging Jet (충돌 제트), Supersonic Nozzle Flow (초음속 노즐 유동), Flame Deflector (화염유도로)

Abstract

When supersonic jet impinges on wall from the nozzle, complex flow pattern appears such as Mach disc, expansion fan, and jet boundary. The numerical computation of this supersonic jet is important on flame deflector design for launch space especially. In this paper, we analyzed supersonic jet structure impinging on deflector wall using three dimensional steady and unsteady compressible equation and showed temperature and pressure distribution on the wall surface. As a result, some dominant factors of jet flows are discussed for conceptual design of flame deflector

1. 서 론

로켓 발사 시 엔진 노즐로부터 분사되는 로켓 제트와 완전연소 되지 못한 연료 그리고 고온, 고압의 분사가스로부터 발사체와 발사장내 주변시설을 보호하도록 후류 및 화염을 안전한 방향으로 유도하기 위하여 발사체 아래 방향으로 화염유도로가 시공된다. 이러한 화염유도로 설계 시에는 고온, 고압의 제트가 충돌하는 화염유도로 벽면에서의 압력 및 온도 조건과 후류의 거동 형태 등이 중요한 설계인자가 된다.

엔진 노즐로부터 분출되는 초음속 유동은 파팽창된 제트와 외부유동이 작용하면서, 충격파와 팽창파가 반복적으로 나타나는 복잡한 셀 형태를 띄게 된다. 이러한 노즐 외부 유동의 충격파 셀(Shock Cell)은 크게 팽창파(Expansion Fan), 마하 디스크(Mach Disk), 제트 경계층(Jet Boundary) 등으로

구성되어 있으나 제트 유동이 경사 벽면에 충돌할 때에는 자유제트와는 또 다른 양상의 유동 형태를 띄게 된다.⁽¹⁾ 초음속 제트 유동이 고체 표면과 충돌하는 상황은 화염유도로 이외에도 로켓의 단분리, 로켓의 지상 발사, 가스 터빈 블레이드 등 여러 상황에서 발생한다. 이러한 충돌제트의 연구는 유동현상이 복잡함으로 인해, 비점성 유동해석을 통한 압력구배와 충격파 구조 연구⁽²⁾ 나 경사평판에 충돌하는 제트의 열전달 연구⁽³⁾ 등은 활발히 진행되고 있지만, 화염유도로와 같이 3 차원 모델에서의 점성유동 해석이나 비정상 상태의 해석은 상대적으로 적게 이루어지고 있다.

본 논문에서는 기 설계된 KSR-III 화염유도로 초기 설계안에 대해 3 차원 압축성 유동 해석을 통하여 유도로 표면에서의 압력 및 온도 조건, 후류의 거동 및 충격파의 형태 등을 계산하였다. 점성 유동과 비점성 유동의 비교를 통해서 점성 및 난류효과가 이러한 제트의 유동구조에 미치는 영향을 살펴보고, 시간에 따른 제트 유동 구조의 변화를 살펴봄으로써, 벽면에서의 온도 및 압력의

* 현대모비스, 응용기술연구부

** 한국항공우주연구원, 추진기관연구부

변화를 고찰하였다. 결론적으로, 화염유도로 표면의 압력 및 온도 변화를 바탕으로 초기 설계안의 유동 특성 검토를 수행하고, 화염유도로 개념설계시에 고려하여야 할 제트 유동현상 및 비정상(Unsteady)적 유동 변화를 살펴 보았다.

2. 본론

2.1 형상 및 경계 조건

Fig. 1은 본 해석에 쓰인 계산 영역을 나타낸다. 엔진 출구로부터 벽면까지의 거리는 엔진 출구직경의 5.75 배이며, 경사각은 60° 이다.

격자수는 약 220,000 개이며, 충격파가 형성되는 엔진 출구로부터 벽면에 이르는 구간에는 격자를 밀집하였다. 유동의 입구 경계조건은 엔진 챔버 내의 전압력으로 주어졌으며, 기타 물성 및 변수 값은 표 1에 나타나 있다. 출구 경계에서는 압력을 대기압으로 일정하게 주었다.

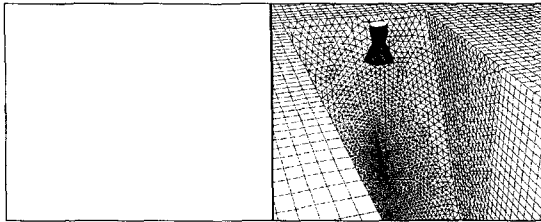


Fig. 1 Computational domain and grid

Table.1 Nozzle inlet boundary condition

변수	값	물성	값
밀도	1.0789 kg/m ³	연소가스 분자량 (M)	22.043 kg/kgmol
압력	1.3789 MPa (200psia)	기체상수 (R)	377.217 J/kg·K
온도	3400 K	비열비 (γ)	1.267
유량	56.3 kg/s		

2.2 수치 방법

정상 상태에서의 유동 분포와 벽면의 온도 및 압력 조건을 계산하기 위해서는 점성 및 난류의 영향을 고려하여, 3 차원 압축성 Navier-Stokes 방정

식과 난류모델로서는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 적용하였다. 비정상 상태에 대해서는 계산상의 효율을 확보하면서 충격파의 발달을 살펴보기 위해, 비점성 유동을 가정하여 3 차원 Euler 방정식을 적용하였다.

계산을 위해서는 상용 유동해석 프로그램인 Fluent v5.5를 사용하였고, 수치스킴으로는 Upwind 방법을 적용하였다.

2.3 결과

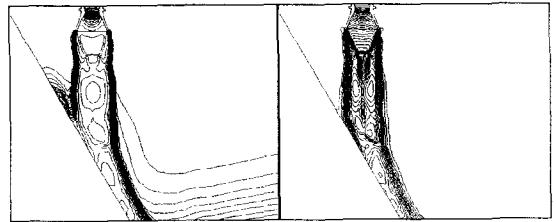


Fig. 2 Density and Mach number contours of inviscid solution at time=0.08 sec

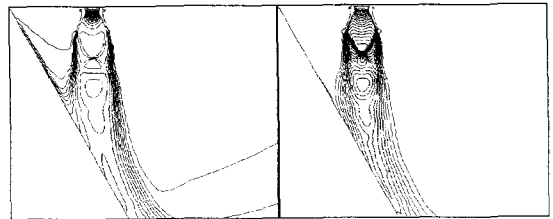


Fig. 3 Density and Mach number contours of viscous solution at steady state

Fig. 2에는 0.08 초에서의 비점성 유동의 밀도 및 마하수 분포가 나타나 있고, Fig. 3에는 점성 유동으로 계산된 정상상태 유동의 밀도 및 마하수 분포가 나타나 있다. Fig. 2에서는 노즐로부터 나온 과 팽창된 제트가 출구에서 배럴 충격파(barrel shock)를 형성하고, 플룸의 중심부에서 마하 디스크를 형성하는 것을 볼 수 있다. 마하 디스크 이후로는 배럴 충격파가 반사되면서 충격파 셀을 형성하게 되며, 경사면 근처에서는 충격파 셀이 벽면으로 인해 수축 되면서 판 충격파(Plate Shock)를 형성하는 것을 볼 수 있다.

점성을 고려 할 경우에는 Fig. 3와 같이 비점성 유동에 비해 유동의 충격파 셀 구조가 점성의 영향으로 후류쪽으로 가면서 소실되는 것을 볼 수 있다. 화염유도로의 벽면에서 최고 온도값은 점성

유동에서는 2010 K, 비점성 유동에서는 2380 K 정도로 나왔다. 화염유도로의 개념설계 단계에서는 비점성 유동으로 가정하여 계산하면, 최적설계 시에 계산상의 효율을 가져오고, 온도 측면에서 좀더 가혹한 상황을 가정 할 수 있기 때문에 안전성에서도 유리하게 작용할 수 있다. 엔진 입구 압력이 대략 1.38 Mpa 이고, 외부 유동이 대기압인 조건에서 대상 엔진의 플룸의 팽창정도는 그다지 크지 않게 나왔으며, 제트 경계층(Jet Boundary)은 노즐 출구 직경에 상당하는 정도로 형성되었다. 벽면에서의 온도 및 압력 조건은 이러한 제트의 구조에 지배적인 영향을 받기 때문에 화염유도로 설계 시에는 마하 디스크의 생성위치 및 제트 경계층의 분포 범위 등을 고려하여야 한다. 마하 디스크를 지난 유동은 압력이 올라가고, 온도는 연소실 내의 값을 거의 회복하게 되기 때문에, 이러한 후류가 적정한 범위 내의 온도 및 압력 값으로 낮아질 수 있기 위해서는 충분한 유도로의 길이 및 폭을 확보하여야 하며, 경사면 근처에 생성되는 충격과의 각도에 따라 벽면에서의 압력 및 온도 조건이 영향을 받기 때문에⁽⁴⁾, 후류 조건에 따라 적정한 경사도를 설정하여야 함을 예측할 수 있다. 이러한 적정 경사각을 위해서는 반복 계산을 통한 최적설계의 과정이 추후에 필요로 된다.

2.3.1 비정상 상태 해석

Fig. 4 에는 시간에 따른 화염유도로 벽면에서의 최대 압력값 및 온도값 변화가 나타나 있다. 최대 온도 값을 나타내는 그래프에서 시간에 따른 오버슈트(Over Shoot)이 미미하므로 정상상태의 값을 기준으로 설계에 반영하여도 무방한 것으로 관찰되었다. 점성 효과가 들어가지 않으면 유동장의 온도가 점성유동에 비해 더 높게 나오게 되므로, 좀더 가혹한 상황을 가정할 수 있게 되는데, 거의 정상상태로 진행된 0.08 초 일 때 벽면에서의 온도가 대략 2380 K 정도로 예측되었다. 벽면에서의 최대압력은 초기에 정압력(Static Pressure)과 전압력(Total Pressure) 모두 오버슈트가 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서 설계 시에는 정상상태의 압력값보다는 이러한 비정상적 특성이 들어간 최대 압력값이 기준이 되어야 한다. 본 계산에서 최대 압력

값은 대략 212,000 Pa (2.09 atm)로 나타났다.

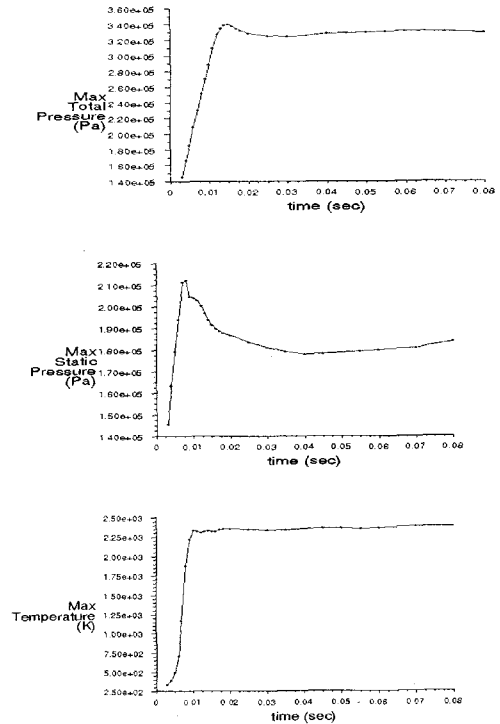


Fig. 4 Time variation of maximum pressure and temperature at deflector wall

Fig. 5 는 시간에 따른 유동장 마하수 분포를 나타낸 것으로 유동이 진행되는 초기에 화염유도로의 곡면 부위에서 약간의 와류가 형성되는 것을 볼 수 있다. 노즐출구에 팽창된 제트가 나오기 시작하면 외부 유동이 노즐 쪽으로 흡입 되므로, 곡선 구간에 대해서는 와류가 형성된다. 그러나 노즐로부터 나온 유동이 충분히 발달하게 되면, 벽을 타고 내리는 유속이 빨라지면서 이러한 와동이 없어지는 것을 볼 수 있다. 초기 제트의 발달 시간을 제외하곤 전반적으로 후류의 영향은 없을 것으로 예측할 수 있다.

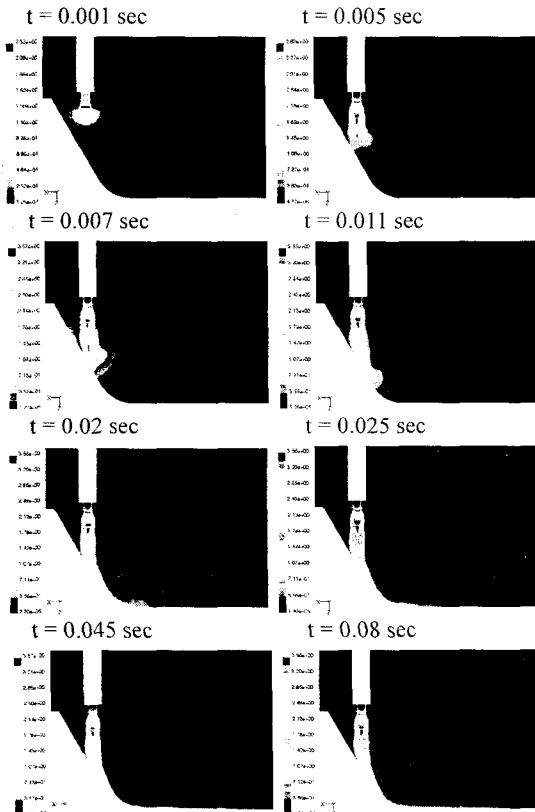


Fig. 5 Unsteady feature of mach number (at symmetric plane)

Fig. 6 에는 시간에 따른 화염유도로 벽면에서의 온도분포가 나타나 있다. 초기에는 충돌지점에서 고온이 형성되지만 유동이 발달함에 따라 충격파 셀이 형성되고, 이 충격파 셀이 벽면에 충돌하면서 벽면에서도 온도의 고저가 반복적으로 나타남을 볼 수 있다. 화염유도로 설계 시에는 고온의 제트로부터 유도를 보호하기 위해, 벽면에서의 충돌 지점 주위로 단열재를 보강하거나 냉각수를 이용하여 냉각을 시키는 부분을 설정한다. 이러한 유도로 벽면의 설계시에는 Fig. 6 에서 보는것과 같이, 충돌 지점뿐만 아니라 충격파 셀의 영향을 받는 부분도 고려하여야 함을 알 수 있다.

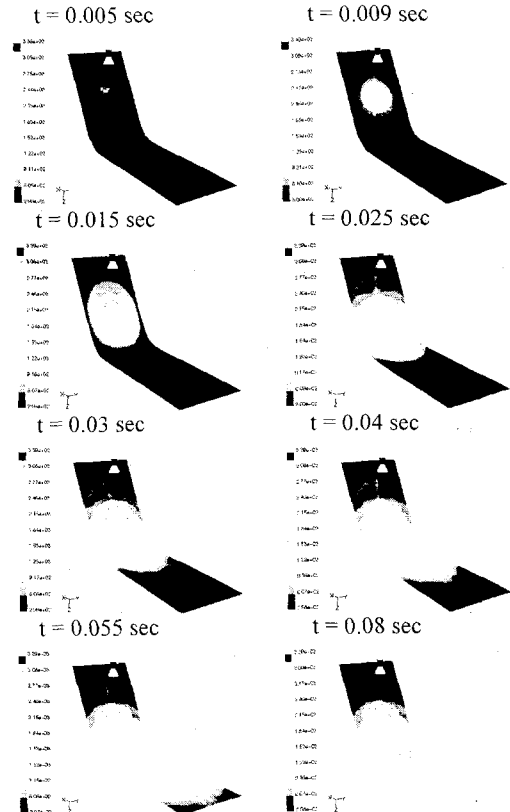


Fig. 6 Unsteady feature of static temperature on deflected wall surface

3. 결론

화염유도로 벽면에 충돌하는 과 팽창 제트의 유동장을 살펴 보기위해 3 차원, 압축성, 점성 및 비점성 방정식을 적용하여 수치적으로 모사하였다. 이를 통해, 경사면에 충돌하는 제트의 유동구조를 파악하고, 벽면에서의 최대압력 및 온도조건을 구하였다. 개념설계 단계에서는 계산 시간 상의 문제와 유동구조의 파악 측면에서 비점성 유동의 적용이 효율적이었으며, 충격파 셀의 구조가 벽면에서의 온도 분포에 미치는 영향을 살펴 보았다. 그리고 비정상 해석을 통해, 정상 상태 이전의 유동장 변화를 살펴 보았고, 설계 시에는 정상상태 이전의 압력상승을 고려하여야 함을 알 수 있었다.

충격파의 위치 및 형태에 따라 유동의 온도 및 압력구배가 결정되기 때문에, 화염유도로의 설계 시에는 이러한 제트 유동의 구조를 파악하고 적절한 유도로 깊이와 경사도를 찾아야 함을 알 수 있

었고, 추후에는 이러한 유동조건을 통하여 최적설계안을 도출해 내는 연구가 필요할 것이다.

참고문헌

- (1) P. J. Lamont and B. L. Hunt, 1980, "The Impingement of Underexpanded Axisymmetric Jets on Perpendicular and Inclined Flat Plate," J. of Fluid Mechanics, Vol. 100, No. 3
- (2) K. H. Kim, K. S. Chang, 1994, "Three Dimensional Structure of a Supersonic Jet impinging on an Inclined Plate," J. of Spacecraft and Rockets, Vol. 31, No. 5
- (3) J. T. Fredericks, M. Shorr, 1973, "Material Evaluation under Direct Rocket Exhaust Impingement," J. of Spacecraft and Rockets, Vol.10, No. 8
- (4) John F. Kennedy Space Center, NASA, 1990, "Standard for Flame Deflector Design"
- (5) T. F. Zien, R. T. Driftmyer, 1979, "Two Dimensional Supersonic Jet Impingement on a Flat Plate," AIAA Journal Vol. 17, No. 1
- (6) E. T. Piesik, R. R. Koppang, D. J. Simkin, 1966, "Rocket-Exhaust Impingement on a Flat Plate at High Vacuum," J. of Spacecraft and Rockets, Vol. 3, No. 11
- (7) K. Jambunathan, E. Lai etc. 1992, "A Review of Heat Transfer Data for Single Circular Jet Impingement," Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 13, No. 2
- (8) 신원순 외 3 명, 2000, "경사평판에 충돌하는 초음속 제트의 수치연구," 유체공학 학술대회 논문집
- (9) Fluent Inc., 1998, "Fluent User's Guide"