# 기저 형상에 따른 PIFS 및 열전달 비교 연구

김 재 관,[1] 이 준 우,[1] 김 규 홍*[2]

# THE COMPARISON OF PIFS AND HEAT TRANSFER WITH BASE CONFIGURATIONS

J. G. Kim,[1] J. W. Lee[1] and K. H. Kim*[2]

*Numerical investigation was conducted to study the effects of after-body configurations and nozzle lip on the PIFS(Plume Induced Flow Separation) and heat flux to the base face. Two dimensional and axi-symmetric non-equilibrium Navier-Stoke's solver with k-ω SST turbulence model was used to solve the launching vehicle type configuration with propulsive jet. The experimental result of Robert J. McGhee was compared with our computational results for code validation. Three types of the after-body configurations (Straight, Boat-tail, Flare type) were simulated for this study. And the nozzle lip effect was studies using the three types of base configurations with same simulation conditions. As a result of numerical investigations, higher pressure ratio condition and boat-tail after-body configuration caused severe PIFS phenomenon but the flare type after-body configuration and low pressure ratio suppressed PIFS. Flare type after-body configuration and low pressure ratio case reduced heat flux to base face. The nozzle lip dispersed the heat flux widely along the base face and the nozzle lip.*

**Key Words :** 플룸에 의한 유동 박리(PIFS), 기저 형상(Base Configuration), 열전달(Heat Transfer)

## 1. 서 론

PIFS는 노즐의 플룸이 특정한 유동 조건에서 상류 유동을 박리시키는 현상으로 Fig. 1에서 보는 것처럼 특정한 압력비에서 노즐의 플룸이 기저면에서 급격하게 팽창하며 재순환 영역을 밀어올리는 경우 동체 표면에서 역압력 구배를 형성하여 유동을 박리시키는 현상이다. 기저에서 PIFS가 발생하면 기저에서 박리영역 및 재순환 영역이 증가하고, 기저에서 비정상 유동을 유발하여 공력적으로 불안정한 특성을 나타낸다. 또한 이런 현상은 기저면에서의 열전달량을 증가시키는 역할을 한다. 따라서 다양한 연구자들에 의해 기저에서의 PIFS 발생에 대한 다양한 연구가 진행되었다. 우선 1970년대 이후 NASA를 중심으로 실험적 연구들이 있어왔다.[1],[2] 1980년대 이후 발달된 컴퓨터 기술을 이용하여 P.G. Bakker[3] 와 S.Raghunathan[4] 등은 냉가스를 이용한 플룸의 기저부 영향에 대한 연구를 수행했고, L.D. Huebner [5] 와 A.Châtelain [6]은 Boat-tail형상에 대한 PIFS 효과에 관한 연구를 수행했다. 본 연구에서 사용된 코드는 Robert j. McGhee [1]의 실험적 연구의 결과인 2가지 기저형상과 각각에 대한 3가지 압력비에 대한 결과를 이용해 검증을 수행했다. 또한 Boat-tail, Straight 및 Flare 기저 형상을 이용해 기저형상과 열전달량의 관계에 대한 연구를 수행했다. 노즐 립(nozzle lip)이 기저 영향에 대한 연구를 수행했다.

1 정회원, 서울대학교 대학원 기계항공 공학부
2 정회원, 서울대학교 기계항공 공학부
* TEL : 02) 880-8920
* Corresponding author, E-mail: aerocfd1@snu.ac.kr

## 2. 본 론

### 2.1 수치해석 기법

공기를 11가지 원소(O, O+, N, N+, NO, NO+, O2, O2+, N2, N2+, e-)를 이용하여 모델링한 2차원 축대칭 비평형 수치해석 방법이 사용되었다. 시간 적분 기법으로는 LU-SGS 기법이 사용되었으며, 플럭스 기법으로는 M-AUSMPW+ 기법[7]이 사용되었다. 난류 유동장 해석을 위해 2방정식 k-ω SST 난류 모델을 상용했다. 복잡한 형상 및 대용량 계산을 위해 MPI를 이용한 병렬계산을 수행했다.

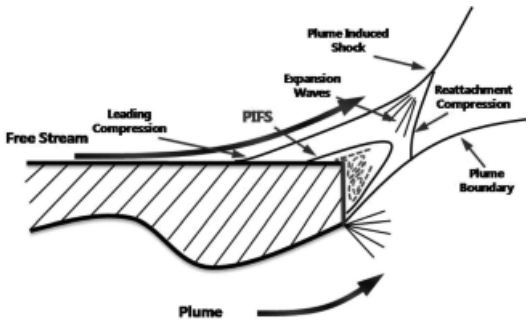


Fig. 1 PIFS Phenomenon

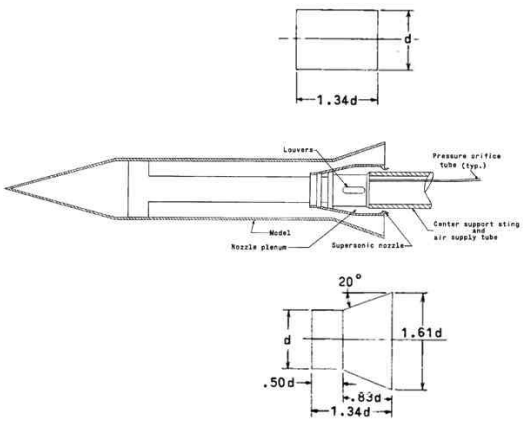


Fig. 2 Experimental Model

## 2.2 검증

PIFS 형상에 의한 기저부 유동 현상 해석 및 열전달 해석 연구를 수행하기 위하여 Robert J. Mcbee의 실험 결과를 이용하여 코드의 정확성을 검증하고자 한다. 이때 실험은 차가운 압축가스를 사용했으며, 형상 및 유동조건은 Table 1과 같다. 실험 형상은 Fig. 2와 같이 전두부는 15°각을 갖는 Cone 형상이고 몸체는 실린더 형상이며, 후미부는 Straight형상과 Flare 형상으로 교체 할 수 있다. 전두부 길이는 6.2624Cm 이고, 몸체는 8.6032Cm로 전체 길이는 19.4384Cm 이며 노즐 내부도 실제 형상을 반영해 계산했다. Robert J. McGhee 는 NASA Langley Research Center에 있는 2피트 초음속 풍동을 이용해 연구를 수행했다.

이때 압력비를 맞추기 위한 정체실 조건은 등엔트로피 가정을 이용해 노즐 출구 압력이 Pjet을 이용해 역산했다. Straight 형상은 자유류와의 압력비가 각각 27, 114 및 244이며, Flare 형상은 압력비가 각각 28, 95 및 330이다. 계산에 사용된 격자계는 Straight 형상은 61×61격자 8 블록으로 구성되고 Flare 형상은 9블록으로 구성했다. 난류 계산을 위한 격자

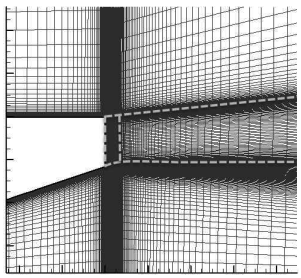

Fig. 3 Grid Convergence Test

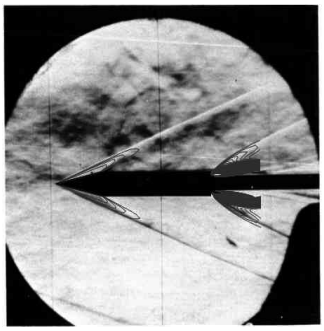

Fig. 4 Comparison with Schelieren Picture($P_{jet}/P_{\infty}$=27)

계를 구성했다. 고도에 따른 박리영역 계산 결과에 대한 신뢰성 확보를 위해 Grid Convergence Test를 수행했다.

기저면 에서의 박리 위치 계산의 정확성을 확보하기 위함이므로 두 블록으로 이루어진 Fig. 3의 점선 영역의 격자계를 세로방향으로 2배, 3배 증가시키면서 동일한 박리위치를 예측하지는 확인했다.

61×61인 격자계의 결과와 61×121의 결과 및 61×181인 격가계의 결과는 거의 일치하고, 두 배 늘인 격자계와의 차이는 결과에 영향을 미치지 않을 정도이다. 즉 동일한 조건에서 61×61 격자계로 충분한 박리결과를 얻었다.

Fig. 4는 Straight 기저 형상에 대해 압력비 27 에서의 계산결과의 밀도분포를 실험 결과의 Schlieren 사진과 겹쳐 그린 것으로 전두부의 충격파 각과 후미부의 PIFS현상이 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 5의 좌측은 전체 동체 표면을 따라 Shear Stress 분포를 그린 것이며, 우측 그림은 좌측

Table 1 Flow Conditions

| | Flow Conditions | $P_{jet}/P_{\infty}$ | | |
|---|---|---|---|---|
| Straight | $Re_{\infty}$= 6.9x10$^6$<br>$M_{\infty}$ = 2.31 | 27 | 114 | 244 |
| Flare | $T_{\infty}$ = 111°K<br>$P_{\infty}$ = 2722.37 Pa | 28 | 95 | 330 |

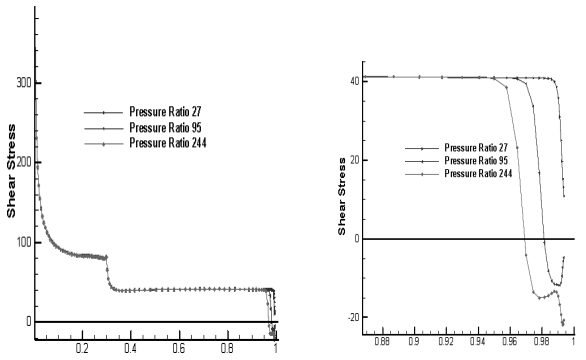


Fig. 5 Surface Shear Stress Comparison

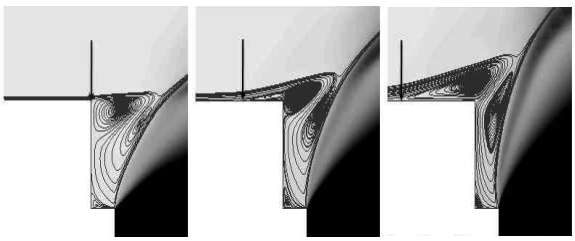

Fig. 6 PIFS Comparison (Pjet/P∞ = 27, 114, 244)

그림의 후미부를 확대한 것이다. 이를 바탕으로 볼 때 압력비 27에서는 PIFS가 발생하지 않으며, 압력비 95에서 244로 증가함에 따라 박리 영역이 전두부 방향으로 확대됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 각각의 압력비에 따른 기저 유동 형상을 비교한 것이다. 압력비가 증가할 수 록 기저에 위치하고 있던 재순환 영역이 플룸의 압력에 의해 전방으로 이동하여 점착되어 있던 상류 유동을 박리시켜 PIFS를 발생시킴을 확 인 할 수 있다.

Fig. 7은 Flare 기저 형상에 대해 압력비 28에서의 밀도분포를 실험 결과의 Schlieren 사진과 겹쳐 그린 그림이다. 전두부의 충격파 각과 기저 후미부의 복잡한 충격파들이 잘 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다. Straight 기저 형상과 달리 기저 형상이 Flare 인 경우 PIFS가 발생하지 않는 것을 Fig. 8을 통해 확인 할 수 있다.

Flare 형상은 0.86 근처에서 형상의 꺽임이 있고 그로 인해 충격파가 발생하여 기저 상류에 Straight 기저 형상에 비해 높은 압력을 유기하게 된다. 이러한 고압 영역은 높은 압력비에 의해 발생 할 수 있는 PIFS를 지연 시키는 역할을 한다. 또한 압력비가 증가할 수 록 재순환 영역이 기저면에 더 붙어서 나타나고 있음을 Fig. 8을 통해 확인 할 수 있다.

### 2.3 기저부-후미부 형상에 따른 열전달 특성 연구

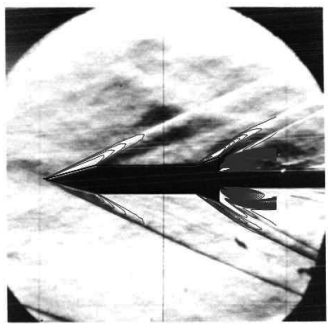

Fig. 7 Comparison with Schelieren Picture($P_{jet}/P_{\infty}$=28)

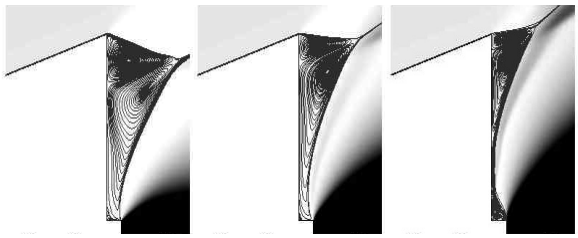

Fig. 8 Recirculation Comparison($P_{jet}/P_{\infty}$ = 27, 95, 330)

기저부 후미 형상과 노즐 출구 형상에 따른 기저 열전달 특성의 상관관계 연구를 위해 세 가지의 기저 형상 및 각각의 경우에 노즐 립이 부착된 기저 형상의 기저면에서의 열전달량을 비교했다. 기저 형상이 다르기 때문에 각각의 경우에 모두 PIFS가 발생하지 않는 자유류 조건을 사용했다. 이때 계산에 사용된 유동조건은 Table 2와 같다.

기저면 으로의 열전달량을 계산하기 위해 표면 온도는 자유류 온도와 동일하게 설정하고 수치 해석을 수행했다. 또한 노즐 내부 벽면은 유동에 의한 가열 현상을 반영하기 위해 단열 벽면 경계 조건을 적용했다.

Fig. 9에 계산에 각각의 기저면 격자계를 비교하였다. 그림의 위 세 경우는 노즐 립이 없는 격자계이고 아래의 경우는 노즐 립을 포함한 경우 이다.

Fig. 10은 각각의 경우 기저면 에서의 재순환 영역을 비교한 결과로 실선으로 그린 것은 노즐 립이 없는 경우의 재순환 영역이고, 점선으로 그린 것은 노즐 립이 있는 경우의 재순환 영역을 나타낸다. 이때 점으로 표시한 지점은 Fig. 11에

Table 2 Flow Conditions

| | Chamber Conditions | Free Stream Flow Conditions |
|---|---|---|
| Boat-tail | $T_c$ = 3000 ◦ K<br>$P_c$ = 700kPa | $Re_{\infty}$ = 4.249e8<br>$T_{\infty}$ = 223.25 ˚K<br>$P_{\infty}$ = 26.5KPa |
| Straight | | |
| Flare | | |

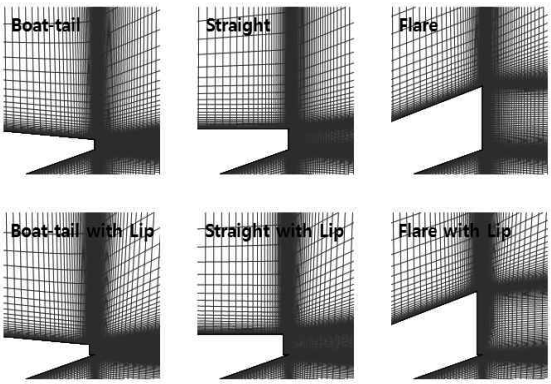


Fig. 9 Base Grid Configurations

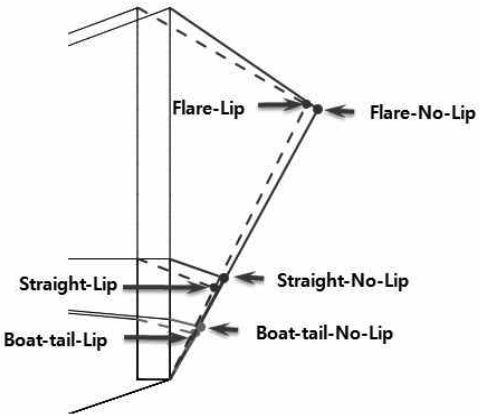


Fig. 10 Recirculation Region Comparison

서 보는 것처럼 상하의 두 와류(vortex)가 만나는 지점이다. Fig. 10 에서 보면 노즐 립이 있는 경와 없는 경우 모두 세 가지 경우가 모두 동일한 선상에 점들이 위치함을 인할 수 있다. 이는 노즐과 재순환 영역이 이루는 각은 노즐 출구 압력과 자유류의 압력비 및 노즐출구부터 기저면 까지 팽창에 의해 정해지기 때문이다. 그에 반해 자유류와 재순환 영역이 만나 이루는 각은 Flare 기저 형상이 가장 작은 값을 가지고 Straight를 거쳐 Boat-tail 기저 형상인 경우 점점 값이 커지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 동체 후미부에서 기저면 으로 유동이 꺾이는 각도가 Boat-tail 형상, Straight 형상 및 Flare 형상 순으로 증가하기 때문이다. 게다가 Boat-tail 형상의 경우 자유류가 기저면 방향으로 팽창하면서 가속되고 그로인해 압력이 감소하기 때문이며, 반대로 Flare 기저 형상의 경우 자유류가 Flare로 인해 만들어진 충격파에 의해 압축되어 Straight 형상에 비해 높은 압력을 갖게 되기 때문이다. 그로 인해 기저에서는 Boat-tail의 경우가 다른 형상의 기저 형태보다 PIFS

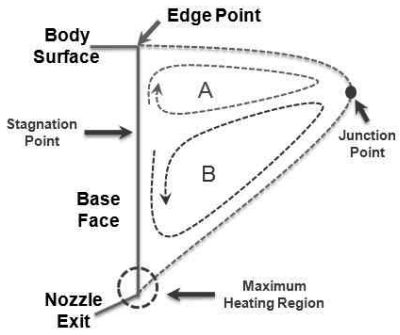


Fig. 11 Base Recirculation

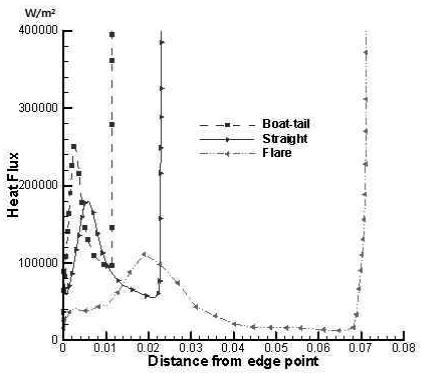


Fig. 12 Heat Flux Comparison without Lip

발생 가능성이 커진다. Fig. 11는 기저에서 발생하는 재순환 영역 내부를 알기 쉽게 설명한 것이다. 재순환 영역 내부에서 시계방향으로 회전하는 와류 A와 반시계 방향으로 회전하는 와류 B가 만나 정체점이 만들어진다. 노즐 출구 근처에서 최대 열전달점이 형성된다. 이는 노즐을 통해 초음속으로 나온 고온 플룸이 기저면 으로 급격한 팽창하게 되면서 순압력 구배(positive pressure gradient)를 형성하게 되고 경계층이 얇아지면서 열전달이 급격하게 증가하기 때문이다. 이러한 현상은 Fig. 12~ Fig. 16에서 모두 나타난다.

Fig. 12은 노즐 립이 없는 경우 세 가지 기저 형상에 대한 열전달량 비교이다. 각각의 형상에서 기저면의 정체점 에서 열전달량이 증가함을 확인 할 수 있고, 노즐 출구에서 최대 열전달이 일어나는 것을 확인 할 수 있다.

또한 Boat-tail 기저 형상 에서 Straight, Flare 기저 형상으로 기저의 길이기 길어지면서 열전달량이 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 기저의 길이가 줄어들면서 재순환 영역이 늘어나게 되고 순환 속도가 줄어들어 열전달량이 전체 기저로 분산되기 때문이다.

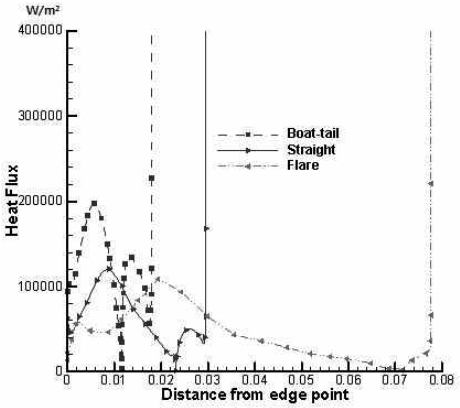


Fig. 13 Heat Flux Comparison with Lip

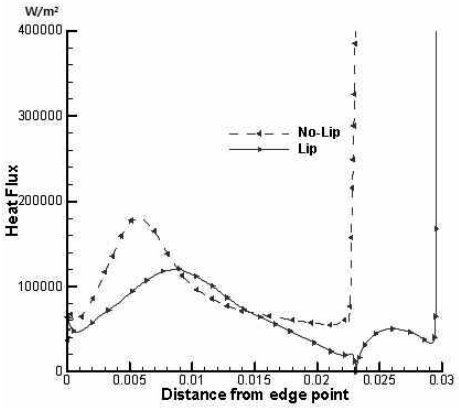


Fig. 15 Heat Flux Comparison of Straight Type Base

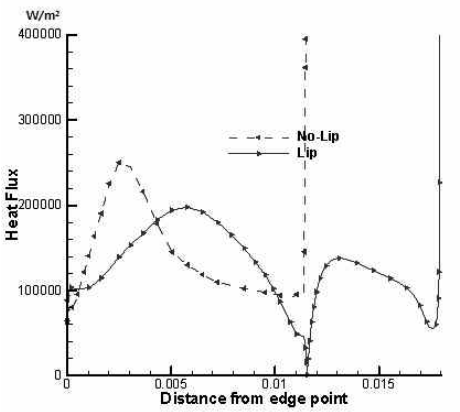


Fig. 14 Heat Flux Comparison of Boat-tail Type Base

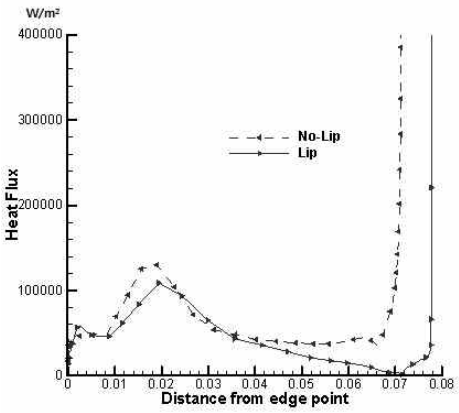


Fig. 16 Heat Flux Comparison of Flare Type Base

이러한 현상은 Fig. 13의 노즐 립을 포함한 기저 형상에서도 동일하게 일어난다. 또한 기저면과 노즐 립이 만나는 곳에서 발생한 작은 규모의 와류로 인해 노즐 립에서 열전달이 국지적으로 증가함을 확인 할 수 있다. 또한 노즐 립의 끝에서 최대 열전달이 발생한다. Fig. 14, Fig. 15과 Fig. 16는 각각의 기저 형상에 따라 노즐 립이 없는 경우와 있는 경우에서의 열전달 특성을 비교한 것이다. 각각의 형상 공통으로 노즐 립이 열전달량을 분산시켜 평균 열전달량을 감소시킴을 확인 할 수 있다. 이를 정량적으로 보여주기 위해 Table 2에서 기저면 에서의 평균 열전달량을 각각의 기저 형상에 따라 정리했다. 이를 보면 Flare 기저 형상이 Boat-tail 형상의 기저 형상에 비해 1/3이하의 열전달량을 보임을 확인 할 수 있다. 또한 노즐 립의 열 분산 효과도 확인 할 수 있다.

## 3. 결 론

검증을 결과를 통해 압력비가 증가함에 따라 Straight 기저 형상에서 PIFS가 발생하여 성장하는 과정을 수치해석 결과를 통해 보였으며, Flare 기저 형상은 높은 압력비 에서도 효과적으로 PIFS를 지연 시키는 것 또한 확인할 수 있었다.

Table 3 Averaged Heat Flux on Base

| | Averaged Heat Flux |
|---|---|
| Boat-tail | 150000W/m$^2$ |
| Straight | 100000W/m$^2$ |
| Flare | 45000W/m$^2$ |
| Boat-tail-Lip | 130000W/m$^2$ |
| Straight-Lip | 60000W/m$^2$ |
| Flare-Lip | 40000W/m$^2$ |

Boat-tail, Straight 및 Flare 기저 형상을 이용해 기저형상과 열전달량의 관계 및 노즐 립이 기저면 열전달에 미치는 영향에 대한 연구를 수행했다. 그 결과로 동일한 유동 조건하에서 기저 형상을 Boat-tail에서 Straight, Flare로 기저면의 길이가 길어지는 방향으로 교체하면 기저면 에서의 평균 열전달량을 감소시킬 수 있음을 확인 하였다. 또한 기저 형상을 달리하여도 노즐에서 기저로 팽창하는 유동은 거의 일치함을 결과를 통해 확인할 수 있었다. 노즐 립이 없는 경우 기저면의 정체점 에서 국지적인 열전달 증가가 발생함을 확인 하였고, 모든 기저 형상에서 최대 열전달 점은 초음속 플룸의 급격한 팽창으로 인해 노즐 출구 근처에서 발생함을 확인 했다. 노즐 출구에 립을 설치할 경우 립이 기저면 에서의 열전달을 분산시키는 역할을 함을 확인할 수 있었다. 또한 최대 열전달 점의 위치도 기저가 아닌 노즐 립 위로 이동시킴을 확인 하였다.

## 후 기

본 논문은 한국연구재단의 국가우주연구실 (S10801000121-08A0100-12110) 프로그램의 지원으로 제작되었습니다.

## 참고문헌

[1] 1970, McGhee, R.J., "Jet-plume-induced flow separation of axi-symmetric bodies at Mach number of 3.00, 4.50, and 6.00," *NASA TM X-2059*.

[2] 1966, Eggers, J.M., "Velocity Profiles and Eddy Viscosity Distributions Downstream of a Mach 2.22 Nozzle Exhausting to Quiescent Air," *NASA TN D-3601*.

[3] 2002, Bakker, P.G. and Bannink, W.J. "CFD Validation for base flows with and without plume interaction," *AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 40th, Reno, NV, Jan. pp.14-17.

[4] 2001, Raghunathan, S., Kim, H.D., Benard, E. Mallon, P. and Harrision, R., "Plume Interference Effects on Missile Bodies," Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 39th, Reno, NV, Jan., pp.8-11.

[5] 1994, Huebner, L.D., "Computational study of plume-induced separation on a hypersonic powered model," *Journal of Aircraft*, Vol.31, No.6, pp.1429-1431.

[6] 2002, Châtelain, A. and Hadjadj, A. "Computational study of a plume-induced flow separation on a boat-tailed after-body," *Proc. 4th Europe Symposium. Aerothermodynamics for Space Applications*, Oct.15-18, 2001, Capua, Italy, ESA-487.

[7] 2005, Kim, K.H. and Kim, C., "Development of the numerical scheme for multi-dimensional flows. Part I: Spatial discretization scheme," *Journal of Computational Physics*. Vol.208, pp.527-569.