

# 전방 분출이 있는 단분리 유동해석

권 기 범<sup>1</sup>, 윤 용 현<sup>1</sup>, 홍 승 규<sup>2</sup>

## Staging Flow Analysis with Forward Ejector

K. B. Kwon, Y. H. Yoon and S. K. Hong

In this study the numerical analysis on staging flow with forward ejector is conducted. The forward ejector plays a vital role in staging, which jets out from aftbody. This staging environment needs careful flow analysis for securing staging safety. Present study investigates the steady inviscid staging flow phenomena with variation of separation distance. The performance index is forebody base pressure coefficients. The three dominant flow phenomena are observed according to separation distance which could be told as impinging stage, cavity vortex dominancy stage, and pure base flow characteristics stage. Impinging stage shows high thrust for forebody as one might think. However, important point is that cavity vortex dominancy stage can be more favorable for separation than impinging stage as one simply think in certain separation distance.

**Key Words:** 단분리(Staging), 전방 분출(Forward Jet), 분리 거리(Separation Distance)

### 1. 서 론

인공위성이나 미사일과 같은 비행체는 적절한 단분리 과정을 통하여 비행거리와 속도를 증가시킨다. 단분리 과정은 그 자체가 복잡한 유동현상을 포함하고 있으며 이에 대한 정확한 해석은 비행체의 성능을 예측하기 위해 반드시 선행되어야 한다.

본 연구에서는 장거리 비행체의 전방체와 후방체가 분리될 때 추력으로 사용하던 후방체의 제트분출류 일부를 전방으로 분출시켜 단분리의 안정성을 증가시키는 형태의 과정에 대한 유동해석을 수행하였다. 즉, 단분리 과정의 유동해석을 통해 유동장의 특성을 분석하고 특히 전방으로 분출되는 제트와 자유흐름과의 상호작용이 이루어지는 흐름에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구에서 얻어야 하는 필요한 성능 지수(performance index)는 후방체로부터의 제트

의 분출과 유동 특성으로 인한 전방체 기저면에 작용하는 공기역학적 힘, 즉 압력계수이다.

따라서 분리 거리에 따른 미사일 본체와 부스터 사이의 유동장 특성을 분석하고 각 분리 거리에서의 성능 지수를 비교해 봄으로써 단분리 과정에서 발생할 수 있는 유동장에 대한 고찰과 후방체의 제트 분출이 전방체에 끼치는 영향을 자세히 분석하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 해석 방법

단분리 과정에 대한 유동해석을 위해 적절한 비행체를 선택하고 전방체와 후방체의 임의의 분리 거리에 대한 격자를 생성하고 각각에 대한 조건을 주어 정상유동해석(steady flow analysis)을 수행하였다.

단분리 해석을 위한 전방체와 후방체의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 또한 단분리의 안정성을 돕는 후방체의 제트 분출구와 분리되는 영역을 Fig. 2에 확대하여 나타내었다.

\*1 정회원, 공군사관학교 항공우주공학과

\*2 정회원, 국방과학연구소

\*E-mail : airborn@afa.ac.kr

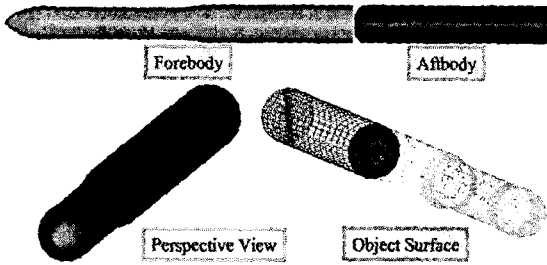


Fig. 1 전방체와 후방체의 개략도

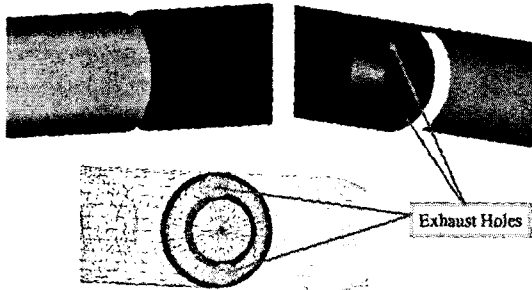


Fig. 2 단분리 영역

전방체와 후방체에 대한 단분리 유동장의 수치적 시뮬레이션을 위해 상용 소프트웨어인 CFD-FASTRAN을 사용하였다. CFDRC사에서 개발된 FASTRAN의 적용가능 범위는 아음속에서부터 극초음속에까지 이른다. 해석 대상에 대한 격자계를 생성하기 위해 CFD-GEOM을 이용하였으며 기본적인 격자 생성 방법은 O-Type Grid를 사용하였다. 이를 Fig. 3에 나타내었다.

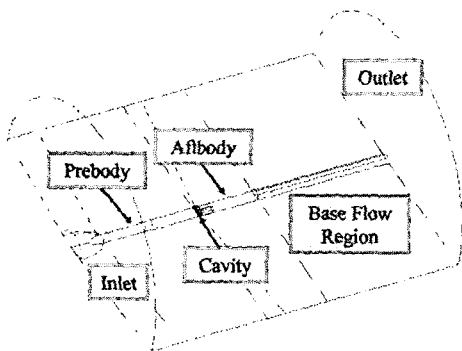


Fig. 3 격자 시스템

비점성 해석을 위한 전체 격자 셀의 수는 분리거리가 0.5D(D : 비행체의 직경)일 경우 약 538,000여 개이다. 해석을 위한 유동조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Test Configurations

Test machine
Cluster(8 Nodes)
Test flow conditions
<ul style="list-style-type: none"> <li>Free-stream Mach No. : 1.5</li> <li>Altitude : 2Km</li> </ul>
Solver conditions
<ul style="list-style-type: none"> <li>Roe's FDS scheme</li> <li>First order spatial accuracy</li> <li>Fully implicit point jacobi iteration</li> <li>Euler Solver</li> </ul>

분리 거리에 따른 후방체의 제트 분출의 원동력인 챔버 압력에 대한 변화조건을 Table 2와 같이 주었다. 챔버 압력은 분리 거리가 멀어질수록 작아진다. Table 2에서  $D$ 값은 비행체의 직경이다.

Table 2 분리 거리에 따른 챔버 압력 변화

Separation Distance	0.2D	0.5D	1.0D	2.0D	3.0D	4.0D	5.0D
Chamber Pressure(psi)	710	400	220	120	110	100	95
Chamber Temperature(K)	2,950						

### 3. 해석 결과 및 토론

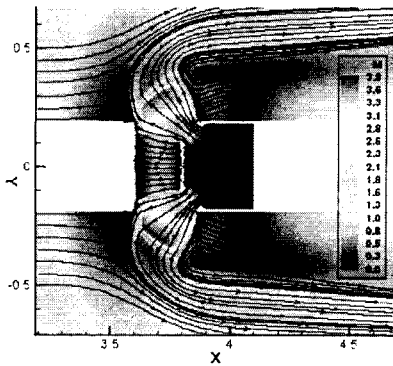
#### 3.1 대칭면에서의 마하수 Contour와 유선

분리 거리에 따른 마하수 Contour와 유선을 대칭면에 대해 0.5D, 0.1D, 4.0D, 5.0D인 경우를 Fig. 4에 나타내었다. 먼저 분리거리가 0.5D인 경우 후방체로부터의 분출 제트가 전방체의 기저면에 부딪치고 있음을 알 수 있다. 또한, Cavity 내에서는 상류방향으로의 흐름밖에 대칭면에서는 이는 상류방향으로의 흐름은 측면 방향으로 빠르게 빠져나가기 때문인 것으로 생각된다.

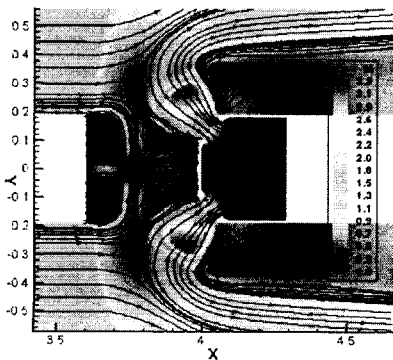
분리 거리가 1.0D부터는 전방체 기저 영역에서 와류가 발생되고 있음을 알 수 있다. 와류는 어느 정도

분리 거리가 되면 후방체에서 분출된 제트가 더 이상 전방체 기저면에 닿지 않고 제트 분출이 없는 Cavity 흐름과 같이 Cavity의 뒷면과 같은 역할을 하게 되어 발생한 것으로 판단된다. 특히 1.0D인 경우의 와류는 분출된 제트에 상당히 구속되어 강한 상류방향으로 흐름을 유발함으로써 전방체 기저면의 중심 부분에 상당한 압력을 작용할 것으로 생각된다.

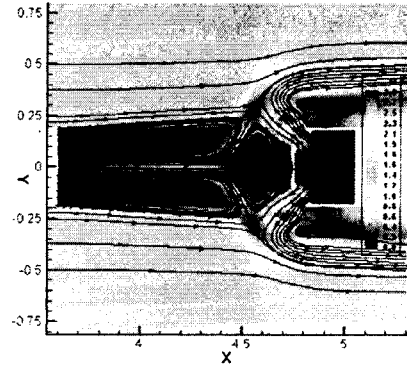
분리 거리가 4.0D까지는 와류 부분이 Cavity 흐름의 형상을 나타내고 Base Flow의 현상은 발생하지 않고 있음을 알 수 있다. 분리 거리가 5.0D인 경우는 전방체가 거의 후방체에서 분출되는 제트의 영향에서 벗어났다고 말할 수 있다. 그 이유는 전방체 기저면 영역에서 일반적인 Base Flow의 현상이 나타나기 때문이다. 이러한 Base Flow의 현상은 기저면에서의 압력계수를 현저히 낮추게 되며 미사일 형상의 비행체에서 항력의 많은 부분을 차지하는 요인이 된다.



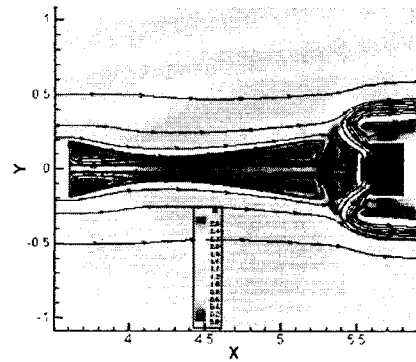
(a) 0.5D



(b) 1.0D



(c) 4.0D



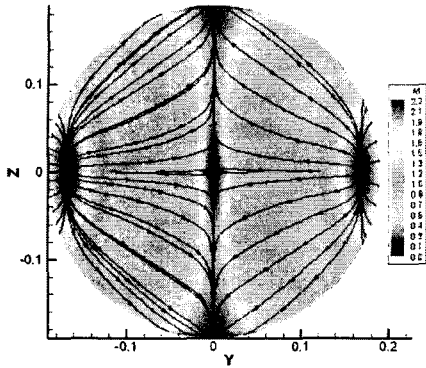
(d) 5.0D

Fig. 4 마하수 Contour와 유선

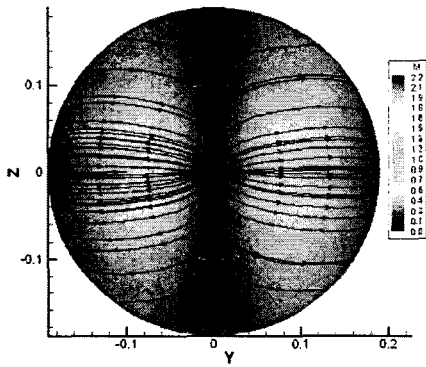
### 3.2 전방체 기저면의 마하수 분포와 유선

분리 거리에 따른 전방체 기저면에서의 마하수 분포와 유선을 Fig. 5에 나타내었다. 분리 거리가 0.5D인 경우에 전방체 기저면에서 제트 Core를 볼 수 있으며 제트 Core를 중심으로 위, 아래의 갈라진 흐름을 볼 수 있다.

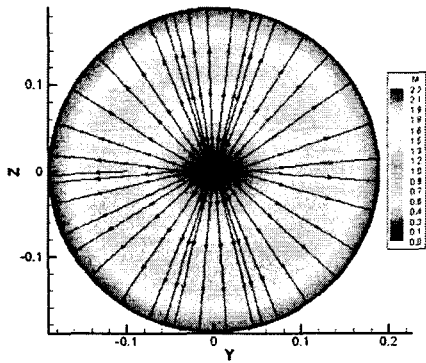
0.5D의 경우와 1.0D의 전방체 기저면 흐름의 가장 큰 차이점은 기저면의 중심으로 0.5D의 경우에는 후방체로부터 분출되는 제트가 전방 기저면에 부딪침으로 인해 위, 아래 흐름이 모여서 측면으로 빠져나가는 것이고 1.0D의 경우는 전방체 기저면 영역에서 와류의 생성으로 중심으로부터 위, 아래로 흐름이 발생하고 있음을 알 수 있다. 물론 1.0D의 경우에서도 측면으로 빠져나가는 흐름을 볼 수 있으나 기저면에서 측면 가까운 영역에서만 어느 정도 빠져나가고 있음을 알 수 있다.



(a) 0.5D



(b) 1.0D

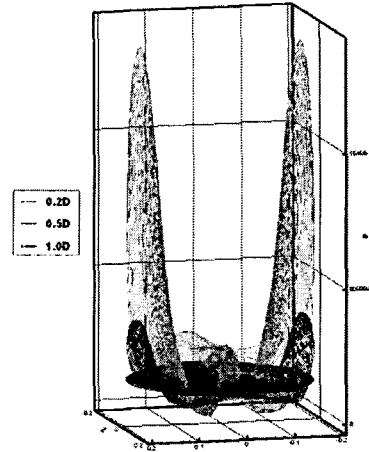


(c) 5.0D

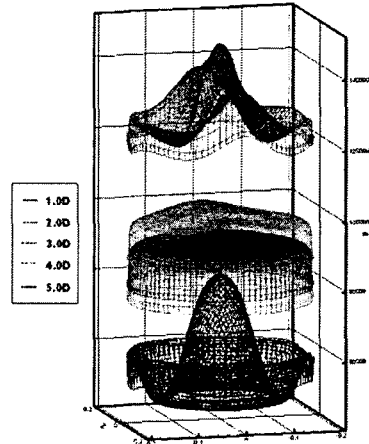
Fig. 5 전방체 기저면의 마하수 Contour와 유선

분리 거리가 5.0D인 경우는 전형적인 Base Flow 흐름에서의 기저면 흐름 분포를 보이고 있음을 알 수 있다.

### 3.3 전방체 기저면의 압력분포



(a) 0.2D, 0.5D, 1.0D



(b) 1.0D, 2.0D, 3.0D, 4.0D, 5.0D

Fig. 6 전방체 기저면의 압력분포

분리 거리에 따른 전방체 기저면의 압력 분포를 Fig. 6에 나타내었다. (a)의 경우에는 0.2D와 0.5D의 분리거리에서 제트 Core가 되는 위, 아래 지점에서 큰 압력 Jump가 발생하고 있음을 알 수 있다. 물론 0.5D의 경우는 0.2D의 경우에 비해 분리 거리도 멀고 챔버 압력도 낮아 제트의 강도가 약해 제트 Core 부분에서의 압력 강하가 상당함을 볼 수 있다. 흥미로운 점은 1.0D의 경우 0.5D의 경우에 비해 제트 Core가 있는 지점 외에는 모두 기저면에서의 압력이 0.5D의 경우보다 높다는 점이다. 0.5D의 경우에는 기저면 중간 부분에서 흐름의 만남과 약한 충격파의 생성으로 다소 압력이 상승하지만 흐름이 빠른 속도

로 옆으로 빠져나가기 때문에 제트 Core를 제외하고는 기저면에서의 압력이 그다지 높지 못하다. 그러나, 1.0D의 경우는 제트가 기저면을 때리지는 않지만 제트로 인해 구속된 기저영역에서의 강한 와류로 인해 전반적으로 기저면에서의 높은 압력을 보여주고 있다.

2.0D, 3.0D, 4.0D의 경우는 경향성은 동일한 와류 형태로 인해 1.0D의 경우와 비슷하지만 분리 거리의 증가와 챔버 압력의 감소로 인한 와류 강도의 감소, 제트 강도의 감소로 전반적으로 기저면에서의 압력이 낮음을 알 수 있다.

분리 거리가 0.5D인 경우에는 전형적인 Base Flow의 기저면 압력 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다.

### 3.4 전방체 기저면의 압력계수의 변화

분리 거리에 따른 전방체 기저면에서의 압력 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 분석하기 전에 한 가지 주의할 점은 압력 계수에 대한 표기가 Fig. 7에서는  $C_x$ 로 주어져 있다는 점이다. 이는 FASTRAN이 제공하는 힘계수에 대한 표기로서 압력에 의한 힘이 비행체의 축방향으로 작용하게 되므로 압력계수와 동일한 의미이다. 그러나, 부호는 반대가 되는데 이는  $x$ 축이 전방체에서 후방체의 방향이기 때문이다. 즉,  $C_x$ 값이 양(+)이면 항력으로 작용하는 것이고 음(-)이면 추력으로 작용하는 것을 의미한다.

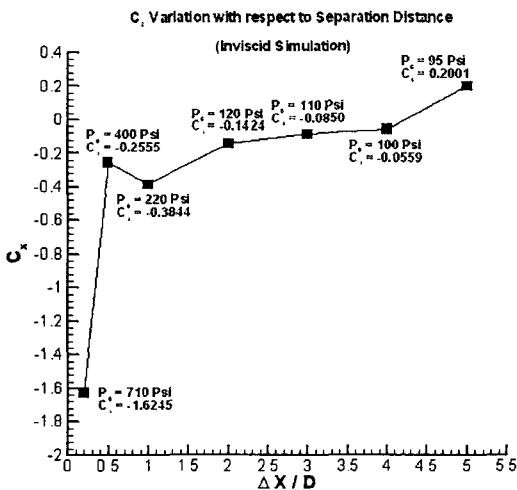


Fig. 7 분리 거리에 따른 전방체 기저면의 압력계수의 변화

Fig. 7로부터 압력계수  $C_x$ 값은 분리 거리가 0.2D에서 값이 가장 작고 분리 거리가 증가할수록 값이 증가함을 알 수 있다. 직관적으로 분리 거리가 0.2D와 같이 작을 경우 후방체의 제트 분출구로부터 분출되는 제트의 직접적인 영향인 것으로 판단된다.

특이한 점은 0.5D에서의 압력계수 값이 1.0D에서의 압력계수 값보다 크다는 점인데 이는 챔버 압력이 높고 분리 거리가 작더라도 3.3절에서 설명한 바와 같은 이유로 인해 1.0D에서는 구속된 Cavity 와류가 0.5D 경우에서의 압력계수보다 낮게 작용될 수 있음을 알 수 있다.

분리 거리가 4.0D까지는  $C_x$ 값이 음(-)의 값을 유지하다가 5.0D에서 양(+)의 값으로 부호가 바뀌었다. 이는 분리 거리가 상당히 증가함에 따라 제트의 영향이 거의 사라지고 전방체 기저면의 전형적 Base Flow에 의한 항력 증가를 보여 주고 있다.

## 4. 결 론

각각의 분리 거리에 따른 유동 해석 결과로부터 대칭면, 기저면 등에서의 마하수 분포와, 압력 분포, 유선 등을 살펴보았다. 분리 거리에 따른  $C_x$ 값은 작은 분리 거리에서 큰 음(-)의 값을 가지게 되고 점점 분리 거리가 늘어남에 따라 작은 음(-)의 값으로 진행한다. 일정 분리 거리 이후에는 Base Flow 형태에 의해 양(+)의 값을 가지게 된다.

특이한 점은 챔버의 압력이 높고 기저면에 제트 Core가 있는 경우보다도 그 보다 챔버의 압력이 낮고 기저면에 제트 Core가 없는 경우라도 구속된 강한 기저면 와류에 의해  $C_x$ 값이 더 큰 음(-)의 값을 가질 수 있다는 점이다. 이러한 현상은 분리 초기에 전방체의 운동에 불규칙성을 가져다 줄 수 있음을 시사해 주고 있다.

Table 3 분리 거리에 따른 공기역학적 현상 구분

Aerodynamic Stage	Characteristics
Impinging Stage	Jet Core Generation
Vortex Dominancy	Cavity Flow Phenomena
Base Flow	Full Drag

본론의 결과로부터 분리 거리에 따른 정상 유동 해석에 의한  $C_x$  값의 경향성과 유동 결과에 대한 분석을 통하여 후방체로부터 제트가 분출되는 방식의 단 분리 방법에서 전방체와 후방체 간의 공기역학적 현상은 세 가지 영역으로 정리될 수 있을 것이다. 이를 Table 3에 정리하였다.

이상과 같은 단분리 시의 유동해석을 통해 단분리 과정의 안정성을 제고하고 이를 설계시의 유용한 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 이후 비정상 흐름에 의한 해석을 시도할 예정이다.

### 후기

본 논문은 국과연의 연구 지원으로 작성되었습니다. 국과연 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] 권기범, 윤용현, 홍승규, "초음속 유동장에 놓은 공동 유동에 대한 연구", 한국전산유체공학회 춘계학술대회, 2003.
- [2] Suhs, N.E., "Computations of Three-Dimensional Cavity Flow at Subsonic and Supersonic Mach Numbers", *AIAA Paper 87-1208*, June 1987.
- [3] Chung-Jen, T., Orkwis, P.D. and Disimile, P.J., "A Comparison of Baldwin-Lomax Turbulence Models for 2-D Open Cavity Computations", *AIAA J.*, Vol.34, No.3, March 1996, pp.629-631.
- [4] Chung-Jen, T., Orkwis, P.D., and Disimile, P.J., "Algebraic Turbulence Model Simulations of Supersonic Open Cavity Flow Physics", *AIAA J.*, Vol.34, No.11, November 1996, pp.2255-2260.
- [5] Heller, H. and Bliss, D., "Aerodynamically Induced Pressure Oscillations in Cavities : Physical Mechanisms and Suppression Concepts", *U.S AirForce Fluid Dynamics Lab., AFFDL-TR-73-133*, Dayton, OH, February 1975.
- [6] Donald P. Rizzetta, "Numerical Simulation of Supersonic Flow Over a Three-Dimensional Cavity", *AIAA J.*, Vol.26, No.7, July 1988, pp.799-807.
- [7] Mansop Hahn, "Experimental Investigation of Separated Flow over a Cavity at Hypersonic Speed", *AIAA J.*, Vol.7, No.6, June 1969, pp.1092-1098.
- [8] Algacyr Morgenstern Jr. and Ndaona Chokani, "Hypersonic Flow Past Open Cavities", *AIAA J.*, Vol.32, No.12, December 1994, pp.2387-2393.