

## 論文

## 직접모사법을 이용한 극음속 대기 유동과 측면 제트의 상호 작용 해석

김민규\*, 권오준\*\*

## Analysis of the Interaction Between Hypersonic Free Stream and Side Jet Flow Using a DSMC Method

Min-gyu Kim\* and Oh Joon Kwon\*\*

## ABSTRACT

The interaction between hypersonic free stream and side jet flow at high altitudes is investigated by using the direct simulation Monte Carlo (DSMC) method. In order to alleviate the difficulty associated with the large density difference between the free stream and the side jet flow and to simulate the two flows simultaneously, a weighting factor technique is applied. For validation, the corner flow over a pair of plates perpendicularly attached is calculated with and without a side jet, and the results are compared with experiment. For a more realistic configuration, the flow past a blunted cone cylinder shape is solved. The leeward or windward jet is injected into the free stream and the effect on the aerodynamic force and moment is observed at various flow angles. The lambda shock effect and the wake structure are studied in terms of the surface pressure differential. A higher interaction between the free stream and the side jet flow is observed when the side jet is injected in the windward direction.

## 초 록

본 논문에서는 직접모사법을 이용하여 고 고도 희박 영역에서 로켓의 자세 제어에 필수적인 측면 제트 분사와 그에 따른 자유 흐름 유동과 측면 제트의 상호 작용에 대한 연구를 수행하였다. 밀도 차가 큰 자유 흐름 유동과 제트 유동을 동시에 모사하기 위해 입자 가중치 기법을 사용하였다. 두 수직인 평판 사이의 유동 및 측면 제트 분사에 의한 상호 작용 해석을 수행하였고 그 결과를 실험치와 비교하여 프로그램을 검증하였다. 좀 더 실제적인 로켓 모델로 blunted cone cylinder 형상에 대하여 받음각을 변화시켜가며 자유 흐름 유동과 측면 제트의 상호 작용에 대한 연구를 수행하였다. 표면 압력 차이의 분포를 기준으로 람다(lambda) 충격파와 후류의 영향을 토의하였다. 받음각이 있는 유동의 경우 leeward 방향으로서는 제트와 자유 흐름 유동의 상호 작용이 약해지며, windward 방향으로서는 상호 작용이 매우 강해지는 것을 확인할 수 있었다.

**Key Words** : Rarefied Gas Flows(희박 기체), DSMC(직접모사법), Unstructured Meshes(비정렬 격자), Side Jet(측면 제트), Weighting Factor Technique(입자 가중치 기법)

† 2004년 10월 20일 접수 ~ 2004년 11월 29일 심사완료

\* 정희원, 한국과학기술원 항공우주전공 대학원

\*\* 정희원, 한국과학기술원 항공우주전공  
연락처, E-mail : ojkwon@kaist.ac.kr  
대전시 유성구 구성동 373-1

## 1. 서 론

유도무기나 로켓의 자세 제어는 크게 공력 제어 방법과 제트 제어 방법의 두 가지로 나뉜다.

고 고도의 희박 영역에서는 동압이 작기 때문에 공력 제어로는 조종 효과를 충분히 얻기 힘들다. 따라서 제트 제어의 사용이 필수적이다. 제트 제어의 경우는 추력 방향 제어와 측면 제트의 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. 추력 방향 제어는 추력 벡터의 방향을 변경시켜 피칭 모멘트를 발생시키는 방법이고, 측면 제트 제어는 무게 중심에 직접 분사하여 제어력을 발생시키거나 무게 중심 앞, 뒤에서 제트를 분사하여 그 모멘트를 이용하여 제어력을 얻는 방법이다. 급속한 기동성과 다양한 자세 제어를 위해서는 측면 제트에 의한 자세 제어가 필요하며, 고 고도의 희박한 환경에서 극음속 대기 유동과 측면 제트의 상호 작용 및 그에 따른 측면 제트의 효율성에 관한 연구는 로켓 개발에 있어서 필수적이다[1].

Tartabini 등은 두 수직한 평판 사이의 마하수 20에 해당하는 극음속 유동에서의 측면 제트 분사에 관한 연구를 수행하였고, 그 결과를 실험치와 비교하였다[2]. Glass와 LeBeau는 각이 있는 평판 위에서의 측면 제트 연구를 수행하였다. 60km 상공에 해당하는 환경에서 마하수 9.84의 극음속 유동을 해석하였으며, 제트 분사 노즐과 인접한 밀도가 높은 영역에 대해서는 연속체 CFD 기법을 이용하고 이로부터 직접모사법의 경계를 설정하여 계산의 효율성을 높이고자 하였다[3]. 또한, Gimelshein 등에 의해서는 blunted cone cylinder 형상에 대한 연구가 최근에 이루어졌다. 이 연구에서는 80~160km의 상공에서 2~5km/s의 속도를 가진 유동에 대해 20도까지의 받음각 변화에 따른 화학 반응을 포함하는 계산을 수행하였다. 측면 제트 분사 유동은 독립적인 축대칭 계산으로 수행하고, 그 결과로부터 분사구 주변에 동일 밀도 경계를 생성하여 외부 유동과의 상호 작용을 해석하였다[4-5].

Glass 등과 Gimelshein 등의 연구에서와 같이 측면 제트 상호 작용 해석을 위해 제트를 분리하여 계산하고 이를 외부 유동과 결합하는 방법은 해석 시간을 줄여줄 수는 있다. 그러나 제트의 특성이 변화함에 따라 항상 측면 제트의 경계를 새로이 결정하여야 하는 불편함이 존재하고, 비정상적인 유동의 특성을 파악하기에도 어려운 단점이 있다. 따라서 계산 시간이 증가할지라도 측면 제트와 외부 유동을 동시에 해석하는 것이 제트의 특성 파악에 더 유리하다고 판단된다.

본 논문에서는 입자 가중치 기법을 도입하여 측면 제트를 분사구부터 직접 외부 유동에 분사하도록 하였다. 직접 분사하는 측면 제트와 외부 유동과의 상호 작용 해석을 통해 현 기법의 타당

성을 검토하도록 하였다. 이를 위해 먼저 두 수직한 평판 사이 유동 및 측면 제트 상호 작용 해석[2]을 수행하고 실험치와 비교하여 프로그램을 검증하였다. 그리고 실제적인 로켓 형상[4]에 대하여 30도까지 받음각을 변화시키며 측면 제트 유동 해석을 수행하고, 각 경우에 나타나는 물리적인 특성을 살펴보고 고 고도 희박 유동과 측면 제트의 상호 작용에 대해 토의하였다.

## II. 수치적 기법

본 연구에서는 직접모사법 격자계로 비정렬 사면체 격자계를 사용하였다. 분자 모델링으로는 가변 강구 모델을 사용하였고, 충돌 표본 채취 기법으로는 비시계수법을 사용하였다. 경계 조건으로는 대칭면에 대한 specular 조건과 벽면에 대한 diffuse 조건, 그리고 원방 경계 조건으로 자유 흐름과 진공 조건을 사용하였다. 이원자 이상의 분자에 대한 에너지 교환 모델로는 Larsen-Borgnakke 현상학적 모델을 사용하였다. 모사 입자 추적 기법으로는 FEM에서 사용되는 선형 형상 함수를 삼차원으로 확장하여 사용하였다[6].

### 2.1 직접모사법의 병렬화

본 연구에서는 효율적인 계산을 위해 MPI 함수를 사용하여 영역 분할 방식으로 직접모사법을 병렬화하였다. 영역 분할 시에는 통신 경계면을 최소화 하기 위해 MeTiS 함수를 사용하였다. 초기 격자를 분할한 후, 작업 균형을 이루기 위해 모사 입자 수를 각 격자에 가중치로 설정하고 이에 적합한 격자 분포를 찾아 격자 재분할을 수행하였다. 이때 모사 입자와 실제 분자의 비를 변화시키며 전체 유동장 내에서 모든 입자를 새롭게 생성하여 가능하면 많은 모사 입자를 사용하도록 하였다[6].

### 2.2 입자 가중치

제트 유동은 연속체에 해당하는 높은 밀도를 갖게 되고, 로켓의 외부 유동은 상대적으로 매우 낮은 밀도를 갖게 된다. 직접모사법에서 모사 입자와 실제 분자 개수의 비는 매우 제한적이다. 외부 유동과 제트 유동의 밀도 차가 매우 크게 되는 경우, 모사 입자의 수를 제트 유동에 기준하여 생성하게 되면 낮은 밀도의 외부 유동에 대한 모사 입자가 충분히 생성되지 못해 직접모사법을 통한 통계학적인 결과의 신뢰성이 떨어지게 된다. 반대로 모사하고자 하는 입자의 수를 희박한 외부 유동에 맞추어 설정하게 되면 높은 밀도

를 갖는 제트 유동을 모사하기 위한 입자의 수가 크게 증가하여 현실적으로 계산이 불가능하게 된다. 따라서 이런 경우에는 외부 유동의 실제 분자에 대한 모사 입자의 비와 제트 유동의 실제 분자에 대한 모사 입자의 비를 다르게 설정하여 각 유동이 충분한 개수의 모사 입자를 보유하도록 하여야 한다. 즉, 각각의 유동에 해당하는 모사 입자의 가중치를 다르게 설정하여 서로 다른 밀도를 갖는 유동들을 동시에 해석할 수 있도록 하여야 한다. 모사 입자 가중치는 실제로 각 모사 입자들의 이동에는 영향을 미치지 않는다. 그러나 서로 다른 가중치를 가지는 모사 입자들이 충돌할 경우에는 그 충돌에 해당하는 확률에 모사 입자의 가중치만큼을 보정하여 충돌 후 모사 입자의 변수를 결정하도록 한다. 또한 샘플링과 통계학적 처리를 수행할 때에도 가중치를 보정하여야 한다. 예로,  $p$  분자에는  $w_p$ 의 입자 가중치를,  $q$  분자에는  $w_q$ 의 입자 가중치를 설정하여 충돌 샘플링 기법인 비시계수법에 대하여 적용하면 미소 시간  $\Delta t$  동안의 총 충돌 수,  $N_{NTC}^w$ , 는 다음과 같이 수정된다.

$$N_{NTC}^w = \frac{1}{2} N_p^w \times \overline{N_q^w} \times \frac{w_p}{w_q} \times \frac{F_{num}}{w_p} \times \{(\sigma_{TCr})_{max}\} \times \frac{\Delta t}{V_c} \quad (1)$$

여기서  $N_p^w$ 와  $N_q^w$ 는  $p$ 분자와  $q$ 분자의 입자 가중치가 적용된 입자 개수이고,  $F_{num}$ 은 기준으로 설정된 모사 입자와 실제 분자의 비이다.  $(\sigma_{TCr})_{max}$ 는 총 충돌 단면에 해당하고,  $V_c$ 는 격자의 부피를 의미한다. 이 때, 충돌 확률은 비시계수법의 충돌 확률과 입자 가중치의 최대값에 대한 해당 입자의 가중치 비를 곱한 형태로 표현된다.

### III. 결과 및 토의

#### 3.1 두 수직한 평판 사이의 유동 해석

Fig. 1은 유동 해석을 위한 표면 격자계이다. 6mm의 두께와 20도의 경사각을 가진 수평 평판 위에 동일한 형태의 수직 평판이 코너를 형성하고 있다. 전체 평판의 길이는 120mm이고 수직 평판으로부터 15mm 떨어지고 수평 평판의 앞면으로부터 60mm 떨어진 곳에 지름 1.53mm의 측면 제트의 분사구가 있다. 계산에 사용된 기체는

질소이다. 유동의 밀도는  $1.7 \times 10^{-5} \text{kg/m}^3$ 이고, 속도는 1,502m/sec, 온도는 13.3K이며, 이에 해당하는 마하수는 20.2이고 평판의 길이에 기초한 Knudsen 수는 0.017이다. 계산에 사용된 격자계는 35,784개의 격자점과 188,713개의 사면체로 구성되어 있으며, 시간 간격은  $1.0 \times 10^{-6}$ 초로 설정하

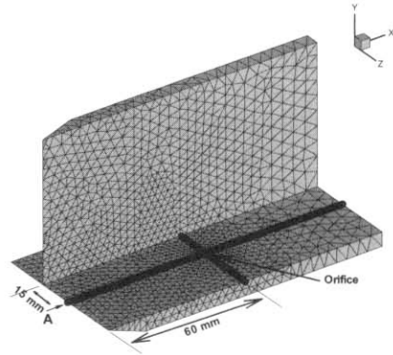


Fig. 1. Surface mesh for horizontal and vertical plates

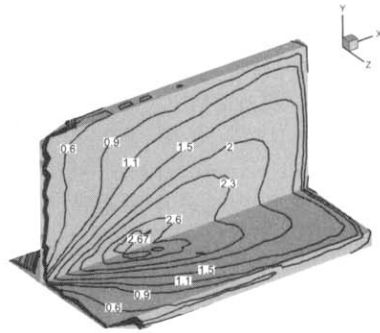


Fig. 2. Normalized surface pressure contours on the horizontal and vertical plates

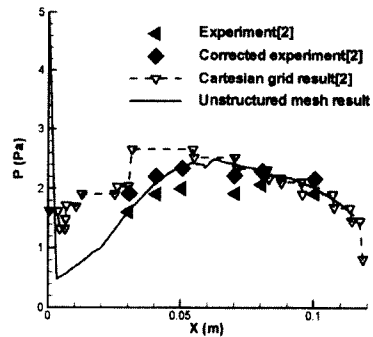


Fig. 3. Surface pressure distribution for flow past the horizontal and vertical plates along line A

였다. 계산을 위해서는 10개의 프로세서를 사용하였으며, 두번의 격자 재분할을 거치며 병렬 작업 균형을 이루었다. 모사 입자는 하나의 프로세서당 약 600,000개 정도로, 총 6,000,000개의 모사 입자를 사용하여 400,000번의 샘플링을 수행하였다.

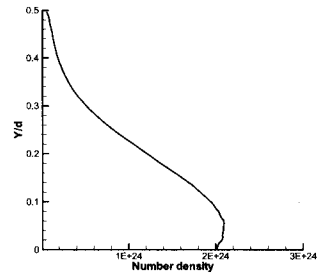
Fig. 2에는 수평 평판과 수직 평판 상에서의, 원방 자유 흐름의 값으로 단위화된 표면 압력 분포를 제시하였다. 수평 평판과 수직 평판이 접합된 코너에서 경사 충격파가 합쳐져서 압력이 증가하는 모습을 볼 수 있다. 본 논문에서 제시되진 않았지만 Tartabini 등의 직각 좌표 격자계의 계산 결과[2]와 비교하면 전체적인 형상은 유사하고 최대값은 약간 작게 나타난다. 그러나 충격파와 충격파의 상호 작용 현상을 더 정확하게 계산하여 두 경사 충격파에 의해 영향을 받는 영역과 받지 않은 영역의 구분이 확연히 보인다.

Fig. 3에는 Fig. 1에서 표시된, 유동 흐름 방향으로 분사구의 중심을 통과하는 선 A를 따르는 표면 압력 분포를 제시하였다. 평판의 앞전을 제외하고 직각 좌표 격자계 결과와 유사한 경향을 보여주며, 실험치와도 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 평판의 앞전은 두 경사 충격파간의 상호 작용 영향을 받지 않으므로 본 계산 결과가 물리적으로 더 타당하다고 생각된다. Fig. 3의 'Experiment'는 실험을 통해 얻은 실험치를 나타내고, 'Corrected experiment'는 제트를 분사한 분사구를 벽면으로 가정하여 보정된 실험치를 의미한다[2].

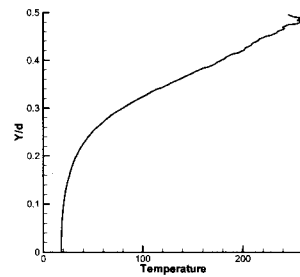
### 3.2 두 수직인 평판 사이 유동과 측면 제트의 상호 작용 해석

측면 제트는 노즐목의 직경이 0.213mm이고 노즐 출구의 직경이 1.53mm가 되는, diverging half angle이 9도인 ESA 노즐[2]을 통해서 분사된다. 해석에 사용된 기체는 질소이고 전압력은  $4.0 \times 10^7 \text{Pa}$ , 전온도는 300K이다. 이 때 노즐목의 직경에 기초한 Reynold 수는 3,200이고 Knudsen 수는  $4.7 \times 10^{-5}$ 이다. 노즐목에서 쇼크가 되었다는 가정을 하여 진공으로 발산하는 축대칭 노즐 해석을 수행하였다.

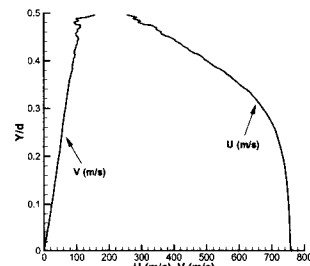
Fig. 4에는 계산을 통해 얻어진 ESA 노즐 출구에서의 속도, 온도, 밀도 값을 제시하였다. 노즐의 Knudsen 수가 직접모사법으로 계산하기에는 너무 작기 때문에 계산의 정확도가 떨어지게 되어, 측면 제트의 세기가 약간 큰 결과를 보인다. 노즐 출구에서의 값을 삼차원으로 변형하여 수평 평판에 위치한 분사구의 측면 제트 경계 조건으로 사용하였다.



(a) Number density



(b) Temperature



(c) Velocities

Fig. 4. Distributions of number density, temperature, and velocities along the ESA nozzle exit line

Fig. 5에는 선 A를 포함하는 수직 평면상에서, 원방 자유 흐름의 값으로 단위화된 밀도 분포를 사용하여 측면 제트의 형상을 나타내었다. 매우 빠른 외부 대기에 의하여 크게 휘어지는 측면 제트의 형상을 관찰할 수 있다. 본 논문에 제시되진 않았지만 직각 좌표 격자계 계산 결과와 비교하면 제트의 휘어지는 위치가 다소 늦게 나타나며 각도도 줄어든 것을 알 수 있다.

Fig. 6에는 측면 제트 분사 후의 표면 압력 분포를 나타내었다. 제트 분사구 앞부분에는 강한 압력이 발생하고, 뒷부분에는 압력이 약해지는 것을 볼 수 있으며 수직 평판의 중간 위치에서 가장 강한 압력을 형성하게 된다. 그 최고치는

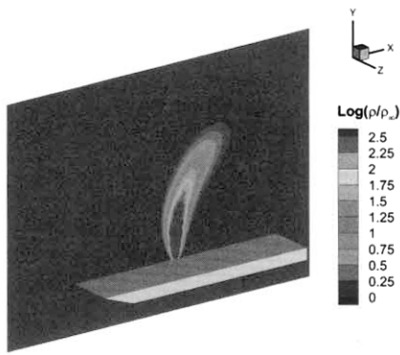


Fig. 5. Normalized density contours on the vertical plane along line A

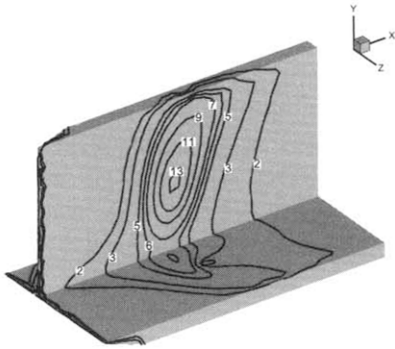


Fig. 6. Normalized surface pressure contours with side jet interaction

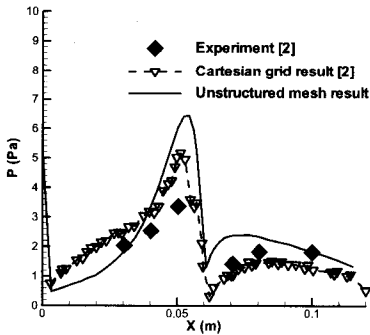


Fig. 7. Surface pressure distribution with side jet interaction along line A

대략 13정도로 직각 좌표 격자계 계산 결과에 비해 작은 값이지만, 실험치에 더 근접한 결과를 보인다.

Fig. 7에는 측면 제트 분사 후 선 A를 따르는 표면 압력 분포를 나타내고 있다. 두 충격파와 측면 제트의 상호 작용으로 인해 복잡한 유동 현

상이 발생하고, 이로 인해 노즐 전, 후로 압력 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 본 계산의 결과는 분사구 전면으로 강한 측면 제트 상호 작용을 보여준다. 분사구 후면의 압력 회복도 빠르게 나타나고 있다.

### 3.3. Blunted Cone Cylinder 유동 해석

다음으로는 좀 더 실제적인 blunted cone cylinder 형상의 로켓에 대한 측면 제트 유동 해석을 수행하였다. 로켓은 반지름 0.05m의 뾰족한 앞전(nose)으로부터 지름이 0.4m이고 길이가 2.7m인 원기둥까지를 1.7m 길이의 원추로 연결한 형상이다. 측면 제트 분사를 위한 분사구는 앞전으로부터 2m 떨어진 곳에 위치한다. 분사구의 출구 면적은 176.7cm<sup>2</sup>이다. 전체 형상은 Fig. 8과 같다. 80km 고도에서 해석을 수행하였으며, 대기 조건으로 온도를 181K, 수 밀도를 4.18×10<sup>20</sup>으로 설정하였고, 질소와 산소의 비는 79%와 21%로 하였다. 외부 자유 흐름의 속도는 2,000m/sec로 하였으며, 이 때의 마하수는 7.5정도이다. 측면 제트를 분사하는 분사구의 유동 조건은 속도가 2,540m/sec이고, 온도는 640K, 수 밀도는 7.29×10<sup>23</sup>이다. 제트 분사에 사용된 분자는 H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO, HCl, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>의 여섯 가지로, 각각 25%, 5%, 23%, 14%, 14%, 19%로 구성되어 있다. 측면 제트는 분사구에서 균일하게 분사된다고 가정하였고, 로켓의 표면 온도는 300K로 설정하였으며, 화학 반응은 고려하지 않았다. 자유 흐름 유동이 유장에 출입하는 경계면과 측면 제트 분사구의 면적을 고려하여 자유 흐름 유동에 입자 가중치 10을 설정하였다. 받음각이 0도인 경우에 대한 계산 격자계는 74,041개의 격자점과 399,061개의 사면체로 구성되어 있다.

총 10개의 프로세서를 사용하여 다섯 번의 격자 재분할을 통해 작업 균형을 유지하였다. 계산에는 총 3,800,000개의 모사 입자를 사용하여 500,000번의 샘플링을 하였다.

Fig. 9에는 측면 제트를 분사 한 후의 결과에서, 측면 제트 구성 분자 중 가장 많은 부분을 차지하는 H<sub>2</sub>O 분자의 수 밀도 분포도와 외부 자

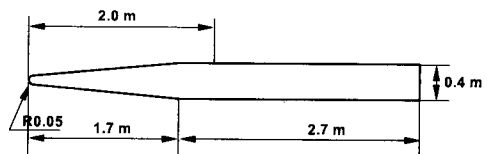


Fig. 8. Configuration of the blunted cone cylinder rocket

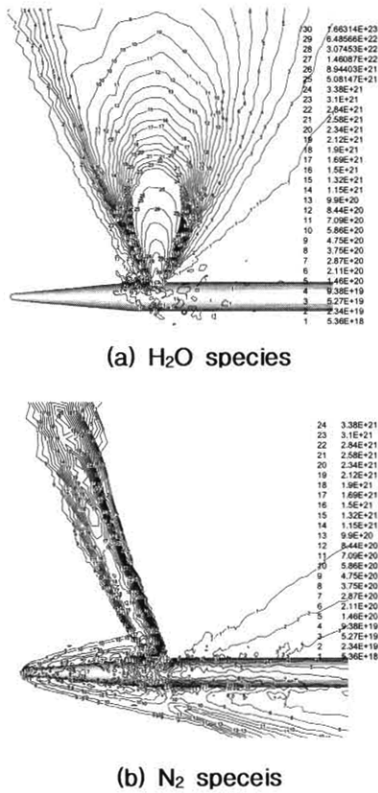


Fig. 9. Number density distributions at the plane of symmetry for 0° flow angle

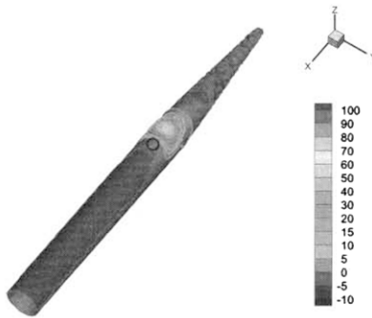


Fig. 10. Surface pressure differential contours on the jet-injected surface for 0° flow angle

유 흐름 유동의  $N_2$  분자의 수 밀도 분포도를 대칭면에서 나타내었다. 자유 흐름 유동이 측면 제트 유동과 충돌하는 현상이 잘 나타나 있으며 강한 압축이 발생하는 것을 확인할 수 있고, 상대적으로 반대편으로는 영향이 거의 없는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 Gimelshein 등의 계산 결과 [4]와 정성적으로 유사하나, 제트 분사가 분사구

로부터 직접 실행되었기에 분사구 주변의 고 밀도 제트 형상 또한 관찰 할 수 있다.

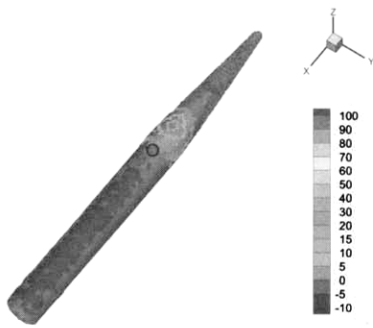
Fig. 10에는 받음각이 0도인 경우에 대하여 측면 제트가 분사되기 전과 후의 로켓 표면 압력 분포의 차이를 나타내었다. 이는 순수하게 제트에 의해 발생하는 추가적인 압력 변화를 의미하게 된다. 저 고도 측면 제트의 상호 작용 문제와 유사하게 측면 제트의 전방에서는 제트와 자유 흐름에 의한 상호 작용으로 강한 압력을 가지는 영역이 존재하여 램다 충격파 효과가 발생하게 되는 것이 확인된다. 측면 제트의 후방으로는 제트에 의해 유도되는 후류 영역이 발생하여 제트 추력을 감소시키는 음의 값을 갖는 영역이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 양의 압력 차이의 세기가 음의 압력 차이 세기보다 확연히 크게 나타난다. 저 고도 고밀도 해석의 경우, 두 압력 차이의 세기가 유사하고 음의 압력 차이 영역이 양의 압력 차이 영역에 비해 넓어서, 전체 제트 상호 작용은 제트 추력의 효과를 감소시키는 결과로 나타난다. 이에 반해 고 고도 저밀도 측면 제트 상호 작용에서는 램다 충격파의 세기가 매우 크게 되어, 전체 효율은 오히려 제트 제어에 호의적인 결과를 보여준다. 이는 Table 1의 수직력 계수에서 확인되며, 고 고도 측면 제트의 상호 작용에서 발생하는 특성으로 파악된다.

### 3.4. 여러 받음각에 대한 측면 제트의 상호 작용 해석

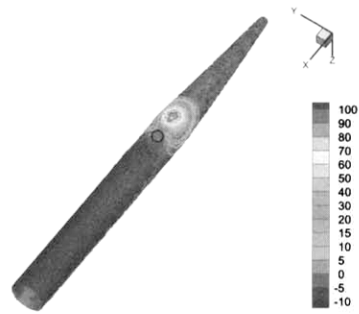
받음각이 있는 경우의 계산에는 받음각이 0도인 경우보다 약 두 배에 해당하는 785,000개의 격자를 사용하였으며, 10개의 프로세서를 사용하여 세 번의 격자 재분할을 수행하였다. 사용된 모사 입자 수는 약 6,000,000개이며 500,000번의 샘플링을 하였다. 외부 자유 흐름 유동이 안정화 된 후 leeward 방향과 windward 방향으로 각각 측면 제트를 분사하였다.

Fig. 11은 서로 다른 받음각에서 leeward 방향으로 측면 제트를 분사하기 전과 후의 표면 압력 차이를 나타내고 있다. Fig. 10과 비교하면 분사구가 leeward 부분에 위치하고 있으므로 자유 흐름 유동과 측면 제트의 상호 작용이 상당히 약화된 것을 볼 수 있다. 측면 제트 앞부분에 발생하는 양의 압력 차이 영역은 작아지고, 그 최대값도 줄어든 것을 볼 수 있으며, 후류 영역에서의 음의 압력 차이 분포도 약화된 것을 볼 수 있다. 이런 경향은 받음각이 증가할수록 크게 나타난다.

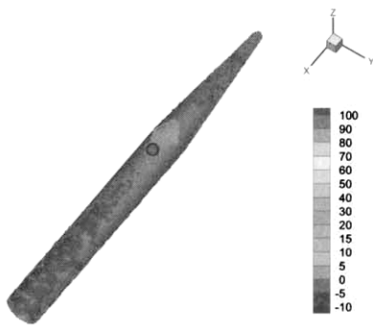
Fig. 12에는 windward 방향으로 분사된 측면 제트에 대한 표면 압력 차이 분포를 제시하였다.



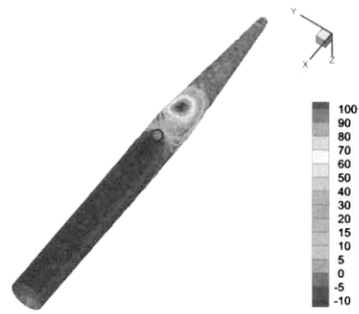
(a) 10° flow angle



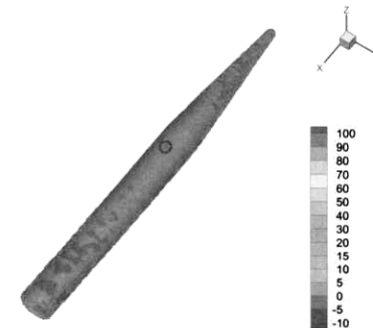
(a) 10° flow angle



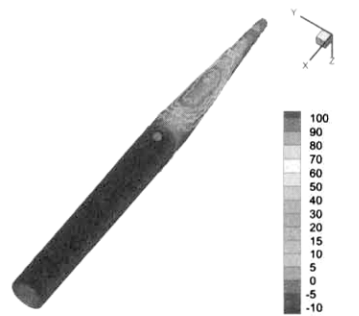
(b) 20° flow angle



(b) 20° flow angle



(c) 30° flow angle



(c) 30° flow angle

Fig. 11. Surface pressure differential contours for the leeward jet injection

Fig. 12. Surface pressure differential contours for the windward jet injection

Fig. 10에 비해 양의 압력 차이 영역이 매우 커지고 강하게 나타난다. 그에 따라 측면 제트가 강한 방어벽으로 작용하여 후류 영역도 넓어지고 음의 압력 차이도 세어지는 결과를 볼 수 있다. 이 효과는 20도 받음각까지는 증가하나, 30도 받음각의 경우는 양의 압력 차이와 음의 압력 차이의 세기가 유사하게 된다. 이 현상은 경사 충격파가 제트 표면에 부착되어, 제트가 분사되는 표면의 밀도를 상승시키고 상호 작용이 저 밀도 영

역을 벗어나서 발생하기 때문이다. 이상의 결과에 대한 수직력 계수와 피칭 모멘트를 Table 1에 정리하였다. 수직력 계수 계산에서 측면 제트 자체의 추력은 고려하지 않았으며, 피칭 모멘트는 로켓의 앞전을 기준으로 하여 앞전이 내려가는 방향을 양의 방향으로 설정하였다. 수직력 계수는 leeward 방향으로 받음각이 10도인 경우에는 제트 분사 전과 비교하여 줄어들었지만, 20도와 30도인 경우에는 측면 제트에

의해 영향을 거의 받지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 피칭 모멘트의 크기에서도 동일한 경향으로 나타난다.

**Table 1. Variation of normal coefficient and pitching moment along the flow angle**

|               | 수직력계수 <sup>a</sup> |        | 피칭모멘트  |        |
|---------------|--------------------|--------|--------|--------|
|               | W/OJet             | W/ Jet | W/OJet | W/ Jet |
| 0도            | 0.00               | -0.63  | 0.00   | -3.07  |
| 10도(leeward)  | 1.00               | 0.65   | 10.42  | 8.41   |
| 10도(windward) | 1.00               | 2.29   | 10.42  | 17.41  |
| 20도(leeward)  | 2.79               | 2.64   | 31.28  | 30.34  |
| 20도(windward) | 2.79               | 4.14   | 31.28  | 31.12  |
| 30도(leeward)  | 5.28               | 5.21   | 63.63  | 62.71  |
| 30도(windward) | 5.28               | 4.50   | 63.63  | 33.35  |

<sup>a</sup>q=5N

받음각이 일정량 이상 커지게 되면 제트와 외부 대기의 상호 작용이 leeward 방향으로는 거의 일어나지 않게 되는 것을 알 수 있다. 이는 고 고도 제트 상호 작용의 또 다른 특성으로 파악된다.

한편 windward 방향으로는 10도와 20도의 경우 수직력 계수가 측면 제트 분사 후 증가하게 된다. 이는 측면 제트 분사 전의 대기 조건이 충분히 희박하고 측면 제트의 세기가 세어서 램다 충격파에 의한 효과가 후류 효과에 비해 강하게 발생하여 나타나는 현상이다. 그러나 30도의 경우에는 램다 충격파에 의한 영향보다 후류에 의한 영향이 더 크게 되어 수직력 계수가 감소하게 된다. 피칭 모멘트는 상대적으로 높은 압력 분포를 보이던 후류 영역의 분포가 약화되면서, 측면 제트 분사 전에 비해 감소하는 경향을 보인다.

고 고도 측면 제트의 경우, 전체 제어 성능은 램다 충격파에 의해 가장 큰 영향을 받은 것으로 보인다. 또한 받음각이 존재하는 경우는 각도와 방향에 따라서 거의 영향이 없는 영역에서부터 점차 영향이 커지고, 일정 받음각 후에는 저 고도 고 밀도 영역에서 발생하는 측면 제트 특성에 이르기까지 여러 가지 거동을 보이게 된다. 이는 로켓의 운영 시 매우 중요한 요소로 설계 시 반드시 고려가 되어야 할 요소로 판단된다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 직접모사법을 이용하여 고 고도

희박 영역에서 로켓의 자세 제어에 필수적인 측면 제트 분사와 그에 따른 제트와 자유 흐름 유동과의 상호 작용에 대한 연구를 수행하였다. 밀도 차가 큰 두 유동을 동시에 모사하기 위해 입자 가중치 기법을 사용하였고, 두 수직한 평판 사이의 유동 및 제트 분사 유동에 의한 상호 작용 해석을 수행하여 프로그램을 검증하였다. 그리고 'blunted cone cylinder' 형상의 로켓에 대하여 받음각을 변화시켜가며 자유 흐름 유동과 측면 제트의 상호 작용에 대한 연구를 수행하였다. 고 고도 측면 제트의 경우, 램다 충격파에 가장 큰 영향을 받는 것으로 판명되었다. 또한 받음각이 있는 유동의 경우 leeward 방향으로는 제트와 자유 흐름 유동의 상호 작용이 약해지는 특성을 나타내었다. 반면, windward 방향으로는 상호 작용이 매우 강해지고 일정 받음각 후에는 저 고도 제트 상호 작용의 특성까지 나타내었다.

#### 후 기

본 연구는 2002년도 국방 과학 연구소의 기초 연구비 지원 "저밀도 공기 역학 해석 기법 연구 (II)"에 의한 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 1) 오승민, 홍승규, "로켓의 공기역학적 형상 설계 고찰", Physics and High Technology, 제 7 권, 제 5호, 1998.
- 2) Tartabini, P. V., Wilmoth, R. G., and Rault, D. F. G., "Direct Simulation Monte Carlo Calculation of a Jet Interacting Experiment", Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 32, No. 1, 1995, pp. 75-83.
- 3) Glass, C. E. and LeBeau, G. J., "Numerical Study of a Continuum Sonic Jet Interacting with a Rarefied Flow", AIAA Paper 1997-2536, 1997.
- 4) Gimelshein, S. F., Alexeenko, A. A., and Levin, D. A., "Modeling of the Interaction of a Side Jet with a Rarefied Atmosphere", Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 39, No. 2, 2002, pp. 168-176.
- 5) Gimelshein, S. F., Alexeenko, A. A., and Levin, D. A., "Modeling of Chemically Reacting



Flows from a Side Jet at High Altitudes",  
AIAA Paper 2002-0212, 2002.

회박기체 영역의 3차원 병렬 직접모사법 개발,"  
한국항공우주학회지, 제 31권, 제 2호, 2003, pp.

6) 김민규, 권오준, "비정렬 격자계를 이용한

1-9.