

비정렬 격자 직접모사법을 이용한 희박 유동과 측면 제트의 상호 작용에 관한 연구

김민규^{*1}, 권오준^{*2}, 안창수^{*3}

DSMC Calculation of the Hypersonic Free Stream and the Side Jet Flow Using Unstructured Meshes

M. G. Kim, O. J. Kwon, C. S. Ahn

The interaction between the hypersonic free stream and the side jet flow at high altitudes is investigated by direct simulation Monte Carlo(DSMC) method. Since there is a great difference in density between the free stream and the side jet flow, the weighting factor technique which could control the number of simulation particles, is applied to calculate these two flows simultaneously. Chemical reactions are not considered in the calculation. For validation, the corner flow passing between a pair of plates that are perpendicularly attached is solved. The side jet flow is then injected into this corner flow and solution is found for the merged flow. Results are compared with the experiments. For a more realistic rocket model, the flow past a blunted cone cylinder shape is solved. The leeward or windward jet injection is merged with this flow. The effect on the rocket surface is observed at various flow angles. The lambda effect and the wake structure are found like low attitudes. High interaction between the free stream and the side jet flow is observed when the side jet is injected in the windward direction.

Key Words : DSMC method, rarefied gas dynamics, hypersonic flow, side jet interaction

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 피칭모멘트를 발생시키는 방법이고, 측면 제트를 사용하는 경우에는 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 수평 평판과 수직 평판 사이의 마하수 20에 해당하는 극음속 유동에서의 측면 제트 분사에 관한 연구를 수행하였고, 그 결과를 실험치와 비교하였다[2]. Glass와 LeBeau는 각이 있는 평판위에서의 측면 제트 연구를 수행하였다. 60km상

*1 학생회원, KAIST 항공우주공학과 대학원,
E-mail : mgkim@kaist.ac.kr

*2 정회원, KAIST 항공우주공학과 부교수,
E-mail : ojkwon@kaist.ac.kr

*3 정회원, 국방과학연구소 3체계개발본부 2부 1팀장

공에 해당하는 환경에서 마하수 9.84의 극음속 유동을 해석하였으며, 제트 분사 노즐의 바깥쪽 밀도가 높은 영역에 대해서는 연속체 CFD 기법을 이용하고 이로부터 직접모사법의 경계를 설정하여 계산의 효율성을 높이고자 하였다[3]. 또한, Gimbelshein 등에 의해서는 blunted cone cylinder 형상에 대한 연구가 최근에 이루어졌다. 이 연구에서는 80~160km의 상공에서 2~5km/s의 속도를 가진 유동에 대해 여러 받음각 변화에 따른 화학 반응을 포함하는 계산을 수행하였다. 측면 제트 분사 노즐은 독립적인 축대칭으로 계산하고, 그 결과로부터 노즐 출구 주변에 동일 밀도 경계를 생성하여 외부 유동과의 상호작용을 해석하였다[4-5].

기존의 연구들에서와 같이 측면 제트의 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 점이 있다. 따라서 계산 시간이 증가하더라도 측면 제트와 외부 유동을 동시에 해석하는 것이 제트의 특성 파악에 더 유리하다고 판단된다. 그러나 제트 유동은 연속체에 해당하는 높은 밀도를 갖게 되고, 로켓 외부의 유동은 상대적으로 매우 낮은 밀도를 갖게 된다. 직접모사법에서 모사 입자와 실제 분자 개수의 비는 매우 제한적이다. 만일 외부 유동과 제트 유동의 밀도비가 매우 크게 되는 경우 주어진 모사 입자를 제트 유동에 기준하여 생성하게 되면 작은 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 밀도를 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, 각 유동에 해당하는 분자들의 가중치를 설정하고, 이러한 가중치에 대한 영향을 적절히 고려하여 서로 다른 밀도를 갖는 유동들을 동시에 해석할 수 있도록 하여야 한다.

본 논문에서는 먼저 수평 평판과 수직 평판에 대

한 제트를 포함하는 유동 해석[2]을 수행하고 실험치와 비교하여 프로그램을 검증하였다. 그리고 입자 가중치를 사용하여 실제적인 로켓 형상[4]에 대하여 받음각을 변화시키며 측면 제트 유동 해석을 수행하고, 표면 압력 분포 및 받음각의 변화에 따른 제트의 영향에 대해 토의하였다.

2. 수치적 기법

본 연구에서는 격자계로 비정렬 사면체 격자를 사용하였다. 분자모델링으로는 가변강구모델을 사용하였고, 충돌표본채취기법으로는 비시계수법을 사용하였다. 경계조건으로는 대칭면에 대한 specular 조건과 벽면에 대한 diffuse 조건, 그리고 원방 경계에의 자유흐름과 진공조건을 사용하였다. 이원자 이상의 분자에 대한 에너지 교환 모델로는 Larsen-Borgnakke 현상학적 모델을 사용하였다. 분자 추적 기법으로는 FEM에서 사용되는 선형형상함수를 삼차원으로 확장하여 사용하였다[6].

1. 직접모사법의 병렬화

본 연구에서는 효율적인 계산을 위해 영역 분할 방식으로 MPI 함수를 사용하여 코드를 병렬화 하였다. 영역 분할을 위해서는 통신 경계면을 최소화 하기 위해 MeTiS 함수를 사용하였고, 초기 격자 분할 이후 격자 재분할 시에는 모사 입자 수를 각 격자에 가중치로 설정하고 이에 적합한 격자 분포를 찾아서 작업균형을 이루도록 하였다. 이때 모사 입자와 실제 분자의 비를 변화시키며 전체 유동장 내에서 모든 입자를 새롭게 생성하여 가능하면 많은 모사 입자를 사용하도록 하였다[6].

2. 입자 가중치

밀도 차가 큰 유동을 모사하기 위한 가중치는 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 후의 모사 입자의 변수를 결정하도록 한다. 또한 샘플링과 통계학적 처리를 수행할 때에도 가중치를 보정하여 계산을 하여야 한다. 비시계수법에 대하여 입자 가중치를 적용하면 총 충돌 수, N_{TTC}^w 는 다음과 같이 수정된다.

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

여기서 N_p^w 와 N_q^w 는 p 분자와 q 분자의 입자 개수이고 w_p 와 w_q 는 입자 가중치이다. F_{num} 은 모사 입자와 실제 분자의 비이고 $(\sigma_T \cdot c_r)_{max}$ 는 총 충돌단면에 해당하고 Δt 는 단위 시간, V_c 는 격자의 부피를 의미한다. 이 때, 충돌 확률은 비시계수법의 충돌 확률에 입자 가중치의 최대값에 대한 해당 입자의 가중치의 비를 곱한 형태로 표현된다.

3. 결과 및 검토

1. 수평 평판과 수직 평판 유동

1.1 수평 평판과 수직 평판사이의 유동 해석

그림 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 앞전으로부터 60mm 떨어진 곳에 지름 1.53mm의 측면 제트의 노즐 출구가 있다. 계산에 사용된 기체는 질소이다. 유동의 밀도는 $1.7 \times 10^{-5} \text{kg/m}^3$ 이고, 속도는 1,502m/s, 온도는 13.3K이며, 이에 해당하는 마하수는 20.2이며 Kn수는 0.017이다. 계산에 사용된 격자계는 35,784개의 격자점과 188,713개의 사면체로 구성되어 있으며, 시간 간격은 $1.0 \times 10^{-6} \text{sec}$ 으로 설정하였다. 계산을 위해서는 10개의 프로세서를 사용하였으며, 두번의 격자 재분할을 거치며 병렬 작업 균형을 이루었다. 모사 입자는 하나의 프로세서 당 약 600,000개 정도이며, 총 6,000,000개의 모사 입자를 사용하여 400,000번의 샘플링을 수행하였다. 그림 2에는 그림 1에서 표시된 바와 같이, x축에 평행하며 노즐 출구의 중심을 통과하는 선 A를 따르는 표면 압력 분포를 제시하였다. 수평 평판과 수직 평판이 접합된 코너에서 충격과가 합쳐져서 압력이 증가하는 모습을 볼 수 있다. 평판의 앞전을 제외하고 Cartesian 격자계를 사용한 결과와 유사한 경향을 보여주며, 실험치와도 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 그림 2의 "Experiment"는 실험을 통해 얻은 실험치를 나타내고, "Corrected experiment"는 제트를 분사할 노즐을

고려하여 수정된 값을 의미한다[2].

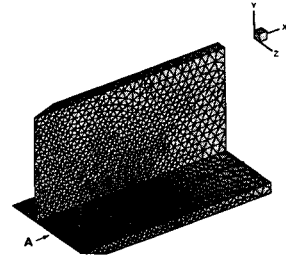


그림 1. 수평 평판과 수직 평판 유동 계산을 위한 표면 격자계

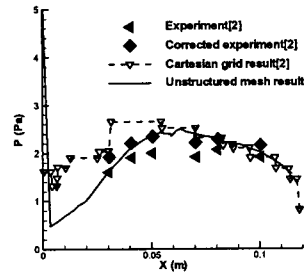


그림 2. A선을 따르는 표면 압력 분포 (측면 제트 분사 전)

1.2 측면 제트 분사 해석

측면 제트는 노즐목에서의 직경이 0.213mm이고 노즐 출구에서 1.53mm가 되는, diverging half angle이 9도인 노즐을 통해서 발사된다. 사용된 기체는 질소이고 전압력은 $4.0 \times 10^7 \text{Pa}$, 전온도는 300K이다. 이 때 노즐 목의 직경에 기초한 레이놀즈수는 3,200이고 Kn수는 4.7×10^{-5} 이다. 노즐 해석을 수행한 후 노즐 출구에서의 값을 삼차원으로 변형하여 수평 평판의 노즐에서 측면 제트를 분사하였다. 그림 3에는 A선을 포함하는 평면상에서 자유 흐름 영역에서의 값으로 단위화한 밀도 분포도를 사용하여 측면 제트의 형상을 나타내었다. 매우 빠른 외부 대기에 의하여 크게 휘어지는 측면 제트의 형상을 관찰할 수 있다. 그림 4에서는 측면 제트 분사 후의 A선을 따르는 표면 압력 분포를 나타내고 있다. 두 충격과와 측면 제트의 상호작용으로 인해 복잡한 유동 현상이 발생하고 이로 인해 노즐 전, 후로 압력에 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

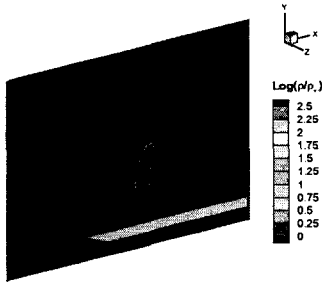


그림 3. A선을 포함한 X-Y평면상의 단위 밀도 분포도 (측면 제트 분사 후)

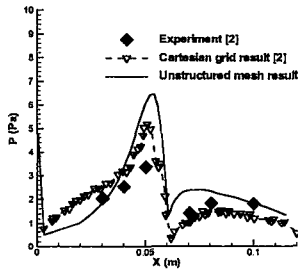


그림 4. A선을 따르는 표면 압력 분포 (측면 제트 분사 후)

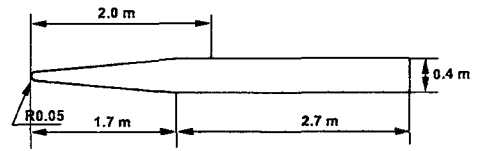
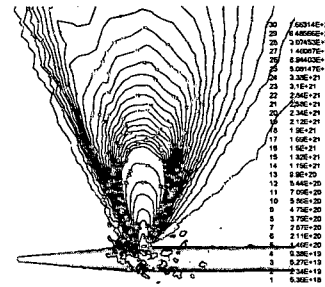
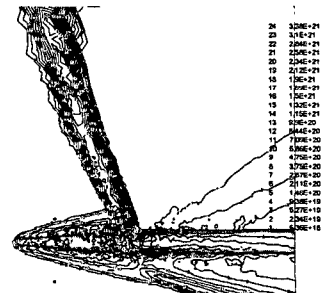


그림 5. Blunted cone cylinder의 형상



(a) H₂O의 수밀도 분포도



(b) N₂의 수밀도 분포도

그림 6. 받음각이 0도인 경우에 대한 대칭면의 수밀도 분포도 (측면 제트 분사 후)

2. Blunted cone cylinder 유동

다음으로는 blunted cone cylinder 형상의 로켓에 대한 측면제트 유동해석을 수행하였다. 로켓은 반지름 0.05m의 뾰족한 nose로부터 지름이 0.4m이고 길이가 2.7m인 원기둥까지를 1.7m길이의 원추로 연결한 형상이다. 측면 제트 분사를 위한 노즐은 nose로부터 2m 떨어진 곳에 위치하며, 원추와 원기둥이 연결된 곳 바로 뒤에 있다. 노즐의 출구 면적은 176.7cm²이다. 전체 형상은 그림 5와 같다. 본 논문에서는 상호 작용이 강하게 발생할 수 있는 고도인 80km에서 계산을 수행하였다. 대기 조건으로는 온도를 181K, 수밀도를 4.18×10²⁰으로 설정하였으며, 질소와 산소의 비는 각각 79%와 21%로 하였다. 자유 유동의 속도는 2,000m/s로 하였으며, 이 때 마하수는 7.5정도이다. 측면 제트를 발생시키는 노즐 출구에서의 유동 조건은 속도가 2,540m/s이고, 온도는 640K, 수밀도는 7.29×10²³이다. 사용된 분자는 H₂O, CO₂, CO, HCL, N₂, H₂의 6가지로, 각각 25%, 5%, 23%, 14%, 14%, 19%로 구성되어 있다.

측면 제트는 노즐에 대해 균일하게 분사된다고 가정하였다. 로켓의 표면 온도는 300K로 설정하였으며, 화학 반응은 고려하지 않았다. 자유 흐름 유동이 유장에 들어오는 경계면과 측면 제트 분사 노즐의 출구 면적을 고려하여 자유 흐름 유동에 입자 가중치 10을 설정하였다. 받음각이 0도인 경우에 대한 계산 격자계는 74,041개의 격자점과 399,061개의 사면체로 구성되어 있으며, 10개의 프로세서를 사용하여 5번의 격자 재분할을 통해 작업 균형을 유지하였다. 계산에는 총 3,800,000의 모사 입자를 사용하여 500,000 샘플링을 하였다. 그림 6에는 측면 제트를 분사 한 후의 결과에서, 측면 제트 구성 분자 중 가장 많은 부분을 차지하는 H₂O 분자의 수밀도 분포도와 자유 흐름 유동의 N₂분자의 수밀도 분포도를 대칭면에서 나타내었다. 자유흐름 유동이 측면 제트

유동과 충돌하는 형상이 잘 보이고 있고, 강한 압축이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 상대적으로 반대편으로는 영향이 거의 없는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 참고문헌[4]의 계산 결과와 정성적으로 유사하게 나타난다.

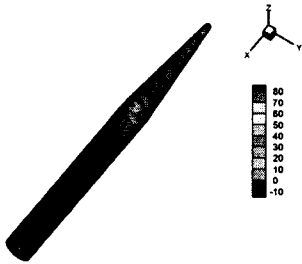
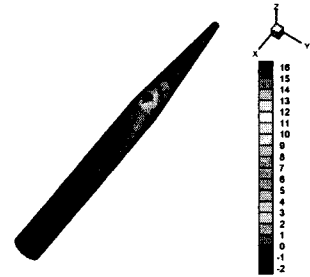
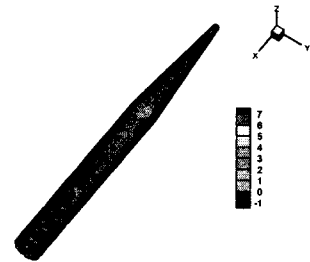


그림 7 측면 제트 분사 전, 후의 표면 압력 차이도 (받음각이 0도인 경우)

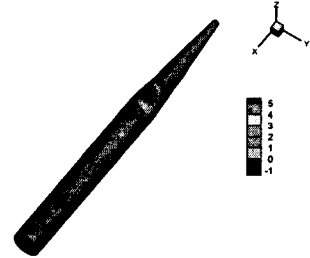
그림 7에는 받음각이 0도인 경우에 대하여 측면 제트가 분사되기 전과 후의 로켓 표면 압력 분포의 차이를 나타내었다. 이는 순수하게 제트에 의해 발생하는 압력을 의미하게 된다. 저 고도 측면 제트 분사 문제와 유사하게 측면 제트의 앞부분에서는 제트와 자유 흐름에 의한 상호 작용으로 강한 압력을 가지는 영역이 존재하여 lambda effect가 발생하게 되는 것이 확인되고, 측면 제트의 뒤로는 제트에 의해 유도되는 wake영역이 발생하여 추력을 감소시키는 음의 값을 갖는 영역도 발생하는 것을 확인할 수 있다. 받음각이 있는 경우는 받음각이 0도인 경우보다 약 2배에 해당하는 785,000개의 격자를 사용하였으며, 10개의 프로세서를 사용하여 세 번의 격자 재분할을 수행하였다. 사용된 모사 입자 수는 약 6,000,000개이며 500,000샘플링을 하였다. 자유흐름 유동이 안정화 된 후 leeward 방향과 windward 방향으로 각각 측면 제트를 분사하였다. 그림 8은 각 받음각에 대한 leeward 방향으로 측면 제트를 분사하기 전과 후의 표면 압력의 차이를 나타내고 있다. 그림 7과 비교하면 leeward에 노즐이 위치하고 있으므로 자유 유동과 측면 제트의 상호 작용이 상당히 약화된 것을 볼 수 있다. 측면 제트 전에 발생하는 고압력 영역은 작아지고, 최대값도 줄어든 것을 볼 수 있으며, wake영역에서의 음의 압력분포도 약화된 것을 볼 수 있다. 이는 받음각이 증가할수록 효과가 크게 나타난다.



(a) 받음각이 10도인 경우



(b) 받음각이 20도인 경우

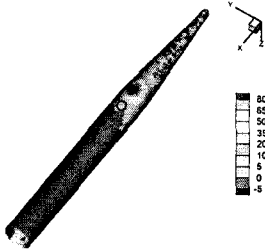


(c) 받음각이 30도인 경우

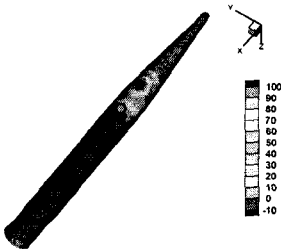
그림 8. Leeward 방향 측면 제트 분사 전, 후의 표면 압력 차이도

그러나 그림9의 windward 방향으로의 측면 제트 분사 전, 후의 압력 분포 차이를 살펴보면 그림 7에 비해 고 압력 영역이 매우 커지고 강하게 되며, 이에 따라 측면 제트가 강한 방어벽으로 작용하여 wake 영역도 넓어지고 음의 압력도 세어지며 해당 영역도 커지게 되는 결과를 볼 수 있다. 이 효과는 받음각이 커지게 되면 증가하나 받음각이 매우 큰 (c)의 경우는 양의 압력 차이와 음의 압력 차이의 크기가 유사하게 된다. 양의 압력 차이가 강하기는 하나 분포 영역이 작고, 반대로 음의 압력은 세기가 작으나 넓게 분포하여 전체적으로는 측면 추력을 감

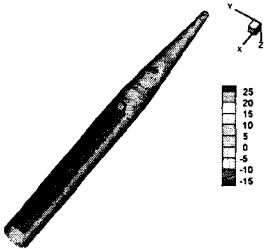
소시키는 결과를 발생하게 되며, 이는 로켓 설계 시에 반드시 고려해야 할 요소로 생각된다.



(a) 받음각이 10도인 경우



(b) 받음각이 20도인 경우



(c) 받음각이 30도인 경우

그림 9. Windward 방향 측면 제트 분사 전, 후의 표면 압력 차이도

4. 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. 밀도차가 큰 두 유동을 모사하기 위해 입자 가중치를 사용하였고, 수평 평판과 수직 평판 사이의 유동 및 제트 분

사 유동에 대한 계산을 수행하여 프로그램을 검증하였다. 그리고 blunted cone cylinder 형상의 로켓에 대하여 받음각을 변화시켜가며 자유 흐름 유동과 제트의 상호 작용에 대한 연구를 수행하였다. 받음각이 있는 유동의 경우 leeward 방향으로서는 제트와 자유 흐름 유동의 상호 작용이 약해지며, windward 방향으로서는 상호 작용이 매우 강해지는 것을 확인할 수 있었다.

5. 후 기

본 연구는 2002년도 국방과학연구소의 기초 연구비 지원 “저밀도 공기역학 해석기법 연구(II)”에 의한 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 오승민, 홍승규, “로켓의 공기역학적 형상 설계 고찰,” Physics and High Technology, 제 7권, 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, Jan. 2002.
- [6] 김민규, 권오준, “비정렬 격자계를 이용한 희박 기체 영역의 3차원 병렬 직접모사법 개발,” 한국항공우주학회지, 제 31권, 제 2호, 2003, pp.1-9.