

DSMC 해석기법을 이용한 희박유동 환경에서의 발사체 Orbital Block 공력특성 예측

김영훈,¹ 옥호남,¹ 최영인,¹ 김인선¹

PREDICTION OF THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF AN ORBITAL BLOCK OF A LAUNCH VEHICLE IN THE RAREFIED FLOW REGIME USING DSMC APPROACH

Younghoon Kim,¹ Honam Ok,¹ YoungIn Choi¹ and Insun Kim¹

The aerodynamic coefficients of Apollo capsule are calculated using a DSMC solver, SMILE, and the results agree very well with the data predicted by NASA. The aerodynamic characteristics of an orbital block which operates at high altitudes in the free molecule regime are also predicted. For the nominal flow conditions, the predicted aerodynamic force is very small since the dynamic pressure is extremely low. And the additional aerodynamic coefficients for the analysis of the attitude control are presented as the angle of attack and the side slip angle vary from +45° to -45° of the nominal angle.

Key Words : 발사체(Launch Vehicle), 오비탈 블록(Orbital Block), 공력특성(Aerodynamic Characteristics), DSMC 기법(DSMC), 병렬 처리(Parallel Processing)

1. 서 론

발사체의 주된 임무는 탑재체를 원하는 고도에 투입하는 것이다. 성공적인 임무완수를 위해 발사체 개발기술에 따라 2단 또는 3단 이상의 다단로켓을 이용하여 발사체를 설계한다. 보통의 발사체는 탑재체 분리 이전에 액체엔진이나 고체 모터를 이용하는 하단부를 분리하고 탑재체를 보호하는 페어링을 분리한다. 하단부와 페어링을 분리하고 남은 구조물을 orbital block이라 부르며, 탑재체와 최상단 동력원, 전자장비가 놓이는 베이(bay)등이 orbital block에 포함된다. 임무요구조건 및 발사체 성능에 따라 orbital block이 비행하는 고도가 결정되며 대부분의 orbital block은 밀도가 매우 낮은 고고도에서 비행을 하게 된다. Orbital block이 비행하는 고고도에서는 특성길이가 크더라도 평균자유행로가 작기 때문에, Kn 수가 높다. Kn 수가 커지게 되면 연속체영역 유동해석에 사용하는 Navier Stokes 방정식을 적용할 수 없으므로, Boltzmann 방정

식을 해석하여야 한다. Boltzmann 방정식의 수학적 해석은 매우 제한된 경우에만 가능하며, 통계적 기법을 이용하여 Boltzmann 방정식을 직접 모사하는 DSMC (Direct Simulation Monte Carlo) 기법이 주로 사용된다. 본 연구에서는 DSMC 기법을 이용하여 고도 200km 이상에서 운용하는 orbital block 주변의 공력특성을 예측하였다.

2. 예측기법

유동장의 계산에는 SMILE(Statistical Modeling In Low-density Environment)[1]을 사용하였으며, 그 내용을 요약하면 다음과 같다. DSMC 해석을 위해 Majorant collision frequency scheme을 사용하였으며, 분자모델은 VHS(Variable Hard Sphere)를 이용하였다. 또한 내부에너지 교환은 Larsen-Borgnakke phenomenological 모델을 적용하였으며, 물체 표면에 반사되는 입자의 운동을 모델링하기 위해 Maxwell 모델을 적용하였다.

물체표면은 비정렬 삼각격자를 이용하였으며, 각 셀에 10개 이하의 분자가 들어가도록 전체 분자개수를 조절하였다.

¹ 정회원, 한국항공우주연구원 열/공력팀

* Corresponding author, E-mail: ykim@kari.re.kr

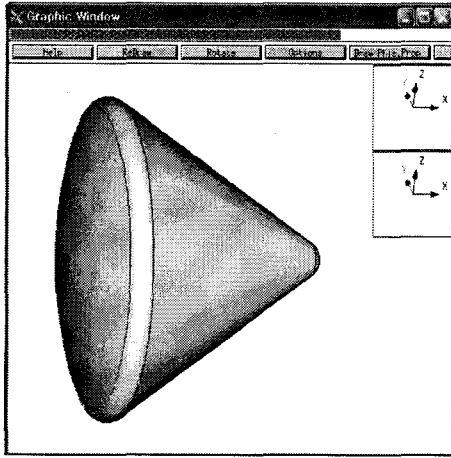


Fig 1. The Apollo capsule configuration generated by GEOM3D

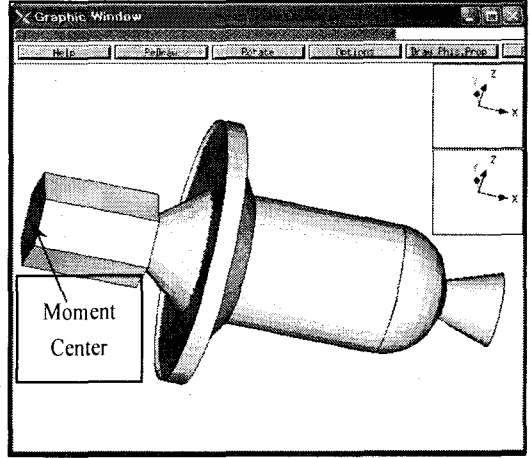


Fig. 3 The orbital block configuration generated by GEOM3D

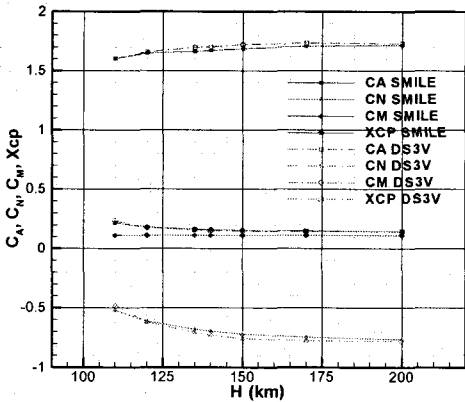


Fig. 2 The aerodynamic characteristics of Apollo Capsule (DS3V [3])

Table 1 The nominal flow condition for the present study

	Angle of attack	Density (Kg/m ³)	Dynamic pressure (Pa)	Kn number
Case 1	-19.56°	2.890E-10	3.443E-03	1.467E+02
Case 2	-11.09°	5.776E-11	6.585E-04	7.016E+02
Case 3	0.18°	2.133E-11	2.349E-04	1.915E+03

Table 2 The aerodynamic coefficients of an orbital block for the nominal flow condition

	Cx	Cy	CMz
Case 1	0.304E+01	-0.869E+00	0.577E+00
Case 2	0.320E+01	-0.491E+00	0.303E+00
Case 3	0.330E+01	0.813E-02	-0.472E-02

Table 3 The aerodynamic forces of an orbital block for the nominal flow condition (L_{ref}=2m, A_{ref}=3.145m²)

	Fx (N)	Fy (N)	Mz (N-m)
Case 1	3.297E-02	-9.409E-03	1.248E-02
Case 2	6.627E-03	-1.017E-03	1.256E-03
Case 3	2.436E-03	6.008E-06	-6.976E-06

보다 빠른 해석을 위해 8개의 processor(2.66 GHz Dual Core CPU, Linux cluster)를 이용하여 병렬처리하였다.

3. 해석코드 검증

Orbital block 해석에 앞서 본 연구에서 이용한 SMILE 해석 코드의 회박영역 공력계수 산출 능력을 검증하였다. 검증 모델로 Apollo 캡슐 형상을 정하였으며 NASA에서 DSMC 기법을 이용하여 산출한 고고도에서의 공력계수[3]와 SMILE을 이용하여 얻은 결과를 비교하였다. Apollo 형상은 Fig. 1과 같으며, 유동조건은 받음각 -25° 및 비행속도 9.6 km/s로 일정하고 고도변화만을 고려하였다. 주어진 유동조건을 이용하여 해석한 결과가 Fig. 2에 나와 있다. SMILE 해석코드를 이용하여

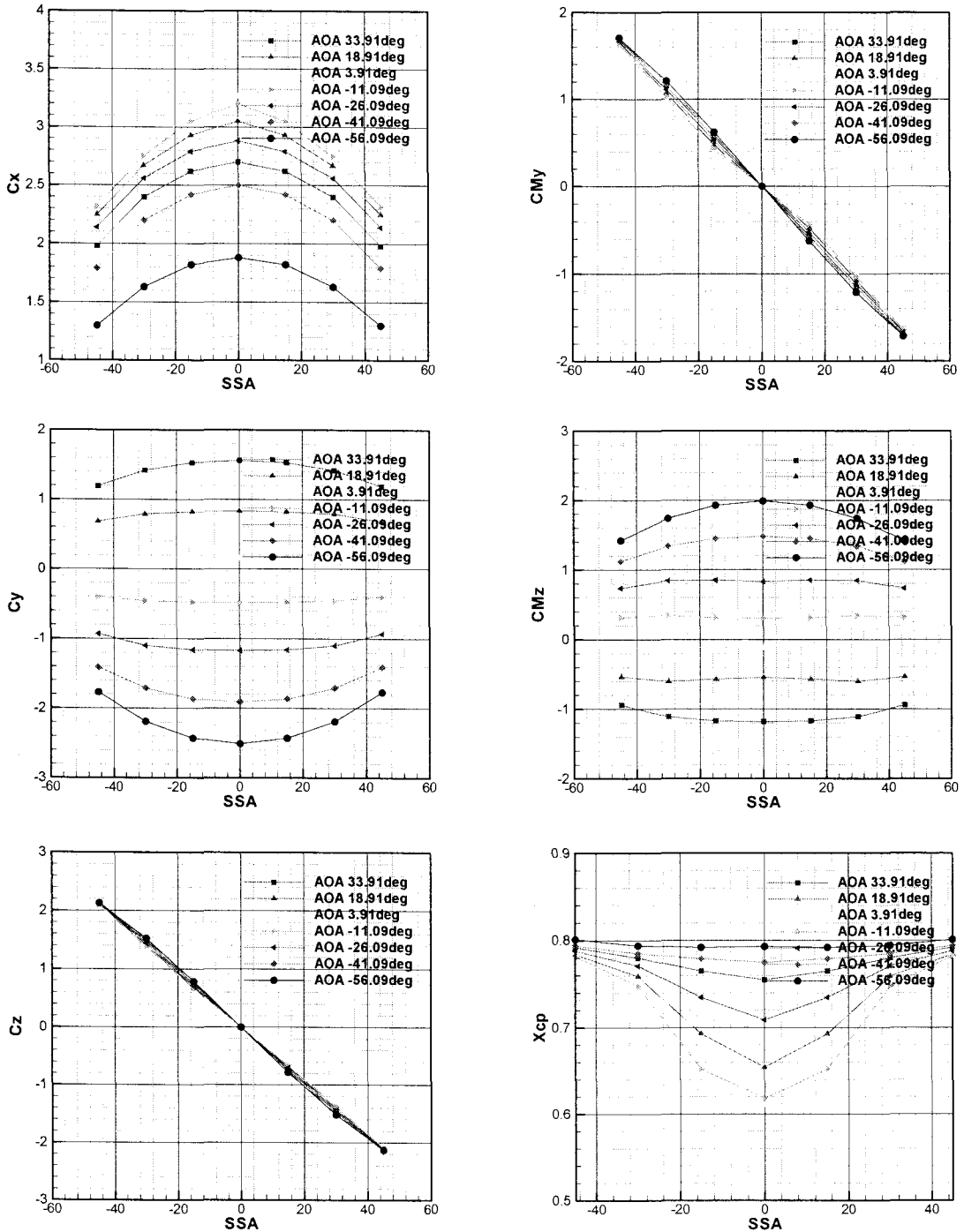


Fig. 4 The variation of the aerodynamic coefficients for an orbital block (Case 2)

얻은 공력계수가 NASA에서 수행한 해석결과와 잘 일치하였다. 계산결과를 통해, 고도가 높아지면서, 축력계수(CA)는 증가하고 수직력 계수(CN)는 감소하는 것을 알 수 있다. 모멘트 계수는 고도의 영향을 거의 안 받지만, 압력중심은 고도가 높아지면서 앞 쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있다.

4. Orbital Block 공력특성

Orbital block이 비행하는 구간은 Kn 수가 매우 높기 때문에 free molecular regime 유동특성을 갖는다. Fig. 3에 단순화한 orbital block의 형상이 나와 있으며 좌표축과 모멘트 센터(0, 0, 0)를 기입하였다. Table 1은 본 연구에서 수행한 세 가지 고도에 대한 유동조건을 나타낸다. 각 고도에 대한 대기조건은 "USSA1976 (U.S. Standard Atmosphere, 1976)" 코드를 이용하여 구하였으며, SMILE 해석코드를 이용하여 구한 공력계수 및 공력하중은 Table 2, Table 3과 같다. 고도가 아주 높아 공기 밀도가 매우 작기 때문에 속도가 높더라도 작용하는 동압은 매우 작은 값을 갖게 된다. 공력계수와 기준 면적이 작지 않더라도 동압이 작기 때문에 작용하는 힘은 매우 작은 힘을 갖게 된다.

Table 1에 주어진 유동조건은 nominal 값이므로 orbital block의 운동해석을 위해서는 주어진 nominal 값에 교란이 있을 경우에 대해서도 공력해석을 수행하여야 한다. 본 해석에서는 nominal 값을 기준으로 받음각 및 옆미끄럼각이 $\pm 45^\circ$ 변할 경우 공력계수가 어떻게 영향을 받는 지를 알아보았다. 해석방법은 nominal 값에 대한 공력해석 방법과 동일하며, 받음각 및 옆미끄럼각을 15° 씩 변화시켜가며 공력계수를 산출하였다. Fig. 4 를 통해, 받음각 및 옆미끄럼각 변화에 따라 공력계수가 어떻게 변하는지를 알 수 있다. 축력계수 Cx는 받음각 및 옆미끄럼각이 커지면 줄어들고, Cy와 CMz는 받음각이 늘어나면 증가하나 반대로 옆미끄럼각이 커지면 그 값이 대체적으로 줄어든다. Cz와 CMy는 받음각 변화에 민감하게 반응하지 않지만, 옆미끄럼각이 커질 경우, 증가한다. 받음각 및 옆미끄럼각이 커짐에 따라 압력중심의 위치는 최대 0.2 켈리버 까지 앞쪽으로 이동한다. 본 논문에는 Case2의 경우만

기재하였으나, 다른 Case역시 공력계수 변화양상이 동일하다.

5. 결 론

희박유동해석코드 SMILE를 이용하여 NASA Apollo 캡슐과 Orbital block형상에 대해 공력계수를 산출하였다. Apollo 캡슐형상에 대한 결과를 NASA 수치해석결과와 비교하였을 경우, 매우 잘 일치하였다. Orbital block 형상에 대해 free molecular region으로 볼 수 있는 3가지 고도에 대해 공력계수를 산출하였다. 힘의 크기는 작지만 Orbital block 운동에 영향이 있을 것으로 판단되며, Orbital block 운동 특성 해석을 위해 주어진 유동조건을 nominal 값으로 하여 받음각 및 옆미끄럼각을 변화시켜가며 공력계수를 추가로 산출하였다. 추후 고고도에서 운용하는 인공위성의 수명예측에도 본 해석기법이 적용가능하며, 특히 고고도에서 지구로 재돌입하는 비행체의 공력특성 해석 시 본 해석기법이 매우 유용하게 쓰일 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] M. S. Ivanov, 2005, "SMILE System USER MANUAL," *Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Russia.*
- [2] M. S. Ivanov, 2005, "Geometry Modeling System USER MANUAL," *Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Russia.*
- [3] J. N. Moss, C. E. Flass, and F. A. Greene, 2006, "DSMC Simulation of Apollo Capsule Aerodynamics for Hypersonic Rarefied Conditions," AIAA 2006-3577.
- [4] M.S. Ivanov, G. N. Markelov, S. F. Gimelshein, L. V. Mishina, A. N. Krylov and N. V. Grechko, 1998, "High-Altitude Capsule Aerodynamics with Real Gas Effects," *Journal of Spacecraft and Rocket*, Vol.35, No.1, pp.16-22.
- [5] R. G. Wilmoth, R. A. Mitcheltree, and J. N. Moss, 1997, "Low-Density Aerodynamics of the Stardust Sample Return Capsule," AIAA-97-2510.