

DSMC 방법 SMILE 코드를 이용한 Rothe 마이크로 노즐 시뮬레이션

최영인* · 김영훈* · 옥호남* · 김인선*

Simulation of Rothe Micronozzle Using DSMC method SMILE code

YoungIn Choi* · Younghoon Kim* · Honam Ok* · Insun Kim*

ABSTRACT

DSMC method is now widely accepted CFD approach to compute and simulate the nozzle plume in rarefied regimes. In this study, using SMILE(Statistical Modeling in Low-density Environment) code which was developed in ITAM, Russia and coded using DSMC method, the internal flow of the Rothe micronozzle was simulated. Moreover, to show the validity of the SMILE code, the centerline temperatures according to the Reynold's number were compared with the ones obtained by the Rothe's experiment.

초 록

고고도에서의 노즐 플룸 해석에 가장 일반적으로 사용되는 CFD 기법은 DSMC 방법이다. 본 논문에서는 DSMC 방법으로 만들어진 러시아 ITAM 연구소의 SMILE 코드를 사용하여 Rothe 마이크로노즐 내부유동을 시뮬레이션하였다. 또한, SMILE 코드 결과의 유효성(신뢰성)을 확보하기 위하여 레이놀즈수에 따른 노즐 내부 centerline의 온도를 Rothe의 실험치와 비교하여 검증하였다.

Key Words: DSMC method(DSMC 방법), SMILE code(SMILE 코드), Simulation(시뮬레이션), Validity(유효성)

1. 서 론

2단형 소형위성 발사체인 KSLV-I은 고도 300 km에 소형위성을 투입하는 것을 목적으로 하기 때문에 연속체 영역인 고도 70 ~ 80 km까지와

그 이후인 고고도 영역(transitional regime인 고도 80km ~ 130 km까지와 고도 130 km 이상의 영역인 free molecular flow)를 모두 통과하게 되어 각 영역에 맞는 공력해석 및 노즐 플룸 해석 방법이 적용되어야한다. 특히 KSLV-I의 2단은 고도 200 km 이상의 영역에서 점화될 예정이기 때문에 고고도에서의 플룸 해석기법용 코드가 반드시 필요하다.

* 한국항공우주연구원 열공력팀
연락처, E-mail: choinkari@kari.re.kr

일반적으로 기체의 밀도가 희박한 고고도 영역에서는 전세계적으로 DSMC 방법이 가장 널리 사용되는 CFD 해석 기법이지만, 아직까지 상용코드로 개발된 것은 존재하지 않는다. 다만, 러시아 노보시비르스크에 위치한 ITAM(Institute of Theoretical and Applied Mechanics) 연구소에서 개발한 SMILE(Statistical Modeling In Low-density Environment) 코드[1, 2]는 상용코드가 아님에도 불구하고, 러시아뿐만 아니라 미국 NASA 및 유럽 ESA 등지에서 고고도 해석 관련 코드로 널리 사용되며, DSMC 방법으로 개발된 다른 코드의 결과 검증용으로 사용될 만큼 그 결과에 대한 신뢰성을 널리 인정받고 있다. 이에 열공력팀에서는 러시아 ITAM 연구소와 계약을 맺어 SMILE 코드를 구매하여 현재 열공력팀 Linux-cluster에 설치하여 사용하고 있다.

본 연구에서는 열공력팀 Linux-cluster에 설치된 SMILE 코드의 성능 및 결과 검증을 위하여 우선 SMILE 코드를 이용하여 Rothe 마이크로노즐 내부유동을 시뮬레이션하고, 레이놀즈수에 따른 Rothe 마이크로노즐 내부 centerline에서의 온도 측정 결과치와 SMILE 코드를 이용하여 구한 값들과 비교하여 SMILE 코드 결과의 유효성을 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 SMILE 코드 소개

DSMC 방법으로 만들어진 SMILE 코드는 Mikhail S. Ivanov 교수를 중심으로 1980년대 후반부터 개발을 시작하여 Gennady Markelov, Sergey Gimelshein 등이 참여하여 1998년에 1차 개발을 완료한 후 AIAA 학회지에 첫 모습을 보였으며, 2006년 현재에는 Linux 운영 기반으로 2D/AxiSym/3D Geometry module, PreProcessing Module, Processing Module, PostProcessing Module 등이 GUI로 완전히 구현된 xSMILE로 발전되어 사용되고 있다.

2.2 SMILE 코드를 이용한 Rothe 노즐 해석 조건

1971년 발표한 Rothe 논문[3]은 2개의 노즐을 이용하여 실험을 하였는데, 본 검증과정에서는 노즐 직경 2.5 mm의 결과와 비교하기로 하였다.

Preprocessing 단계에서는 먼저 SMILE 코드 자체 chemical DB를 이용하여 계산에 사용될 분자(본 검증에서는 Rothe가 실험에서 사용했던 질소(N₂))를 선택하고, geometry module을 이용하여 Fig.1과 같이 geometry 및 격자를 생성하였다. 노즐 벽면의 온도는 300k로 주었으며, 분자가 벽면과 충돌할 시에는 diffuse 조건에 따라 반사하게 된다.

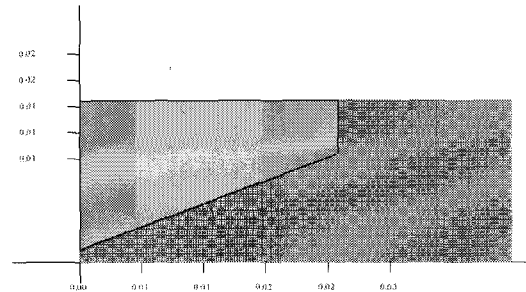


Figure. 1 Geometry and Grid

Fig. 1에 보면 격자가 있는 부분과 없는 부분으로 나타낸 것이 보이는데, 격자가 없는 부분은 실제 계산에서는 전혀 필요가 없는 부분이므로(노즐벽 외부), geometry에서 cut region으로 설정되었기 때문이다. 사실 DSMC 방법이 일반적인 연속체영역의 CFD 코드와 비교했을 때 가장 문제가 되는 부분이 바로 계산시간이 오래 걸린다는 것인데, 그 부분을 조금이나마 보완하기 위하여 SMILE 코드에는 여러 부가기능들이 있는데, cut region 기능 또한 그 중 하나이다.

Geometry 및 격자 생성 이후에는 노즐목에서의 starting surface 입력 변수들(number density, 온도 등)을 레이놀즈 수(590, 1230)에 따라 설정한다.

마지막으로 설정할 항목은 생성할 모사입자의 갯수 및 단위계산시간인 timestep, 그리고 계산

에 사용될 프로세서 갯수이다. Rothe 노즐 계산에는 4개의 프로세서(2.66 GHz Dual Core CPU, Linux Cluster)를 사용하였으며, 계산에 사용된 총 모사입자 수는 약 110만 개, Timestep은 3E-9로 설정하였다.

Processing 단계에서는 sampling 前 timestep 횟수와 sampling 횟수, 계산을 빠르게 하기 위한 Doubling 설정 등을 할 수 있는데, Rothe 노즐의 계산을 위해서는 sampling 前 약 5만 번의 timestep 횟수를 설정하였고, sampling은 100만 번 정도 수행하였다.

3. 결 과

SMILE 코드를 이용하여 레이놀즈 수가 590일 때와 1230일때의 Rothe 마이크로노즐을 해석하였다. 먼저 레이놀즈 수가 590일때를 계산해보았다.

충분하게 수렴된 결과를 Postprocessing에 이용하기 위하여 timestep에 따른 노즐의 Fy값을 Fig. 2에 나타내었다. 50만 timestep 이후로는 Fy값의 변화가 없으므로 수렴했다고 생각할 수 있지만, Postprocessing의 Kaptic 기능을 이용하여 샘플링된 유동장을 직접 plot하여 눈으로 확인할 필요가 있다. 이번 경우에는 최소 70만 번의 timestep 이후 좋은 결과를 보였다.

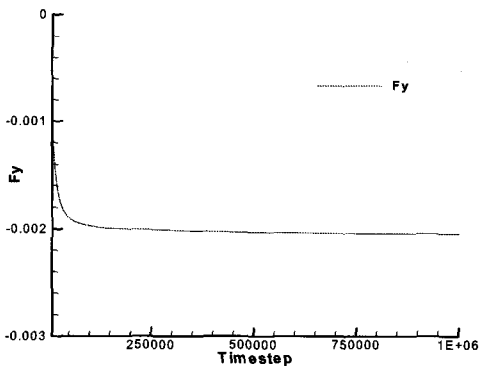


Figure 2. Fy according to timestep

Fig. 3와 Fig. 4는 레이놀즈 수가 590일 때 Fig. 2를 참고하여 충분히 수렴된 결과를 보여준다고 예상되는 100만 번의 timestep 이후 노즐 내부의 밀도와 온도장을 나타낸 것이다.

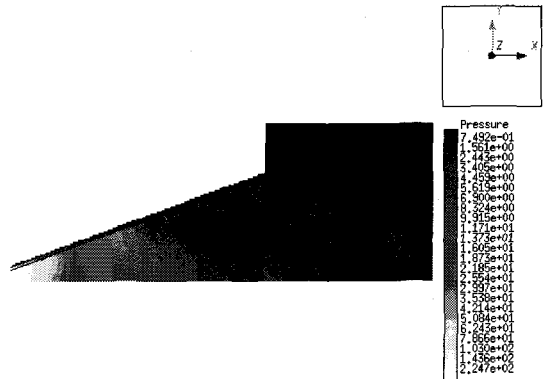


Figure 3. Density field of Nozzle

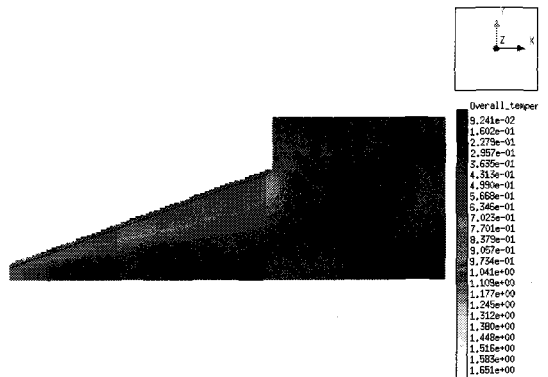


Figure 4 Temperature field of Nozzle

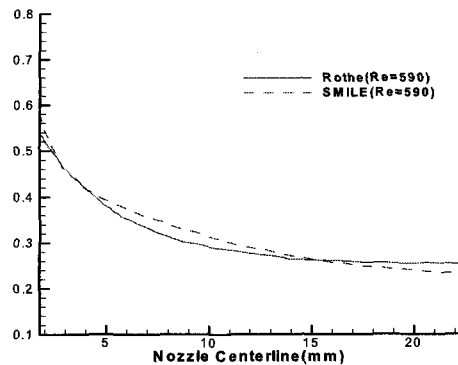


Figure 5 Comparison of Centerline temperature

Fig. 5는 레이놀즈 수가 590일 때, Rothe의 실험치와 SMILE을 이용하여 계산한 노즐 내부 centerline 온도를 비교한 것이다. 거의 일치함을 알 수 있다.

Fig. 6은 레이놀즈 수가 1230일 때를 실험치와 비교한 것인데, 레이놀즈 수가 590일 때와 마찬가지로 거의 일치함을 확인할 수 있다.

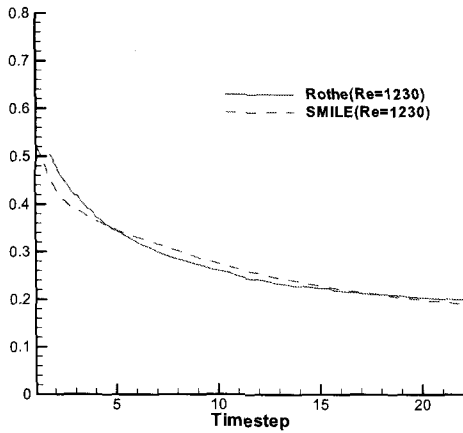


Figure 6. Comparison of Centerline temperature

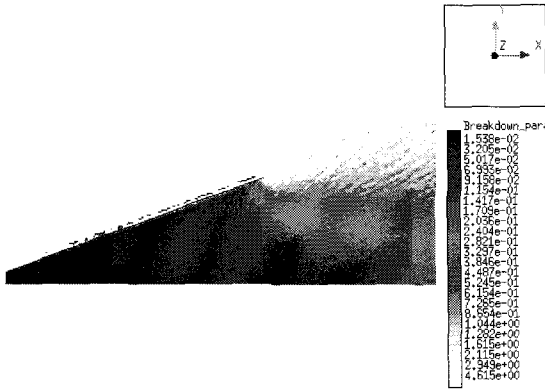


Figure 7. Breakdown parameter

Fig. 7은 Rothe 노즐 내부 유동장을 G.A. Bird[4]의 breakdown parameter(이하 bp)를 이용하여 계산한 것이다. 일반적으로 bp가 0.03보다 같거나 크면 연속체 코드는 사용할 수 없는데, Fig.

7을 보면 노즐 내부 유동의 반 정도는 연속체 영역으로도 계산이 가능하다는 결론을 내릴 수 있다.

4. 결 론

지금까지 1971년 Rothe가 실험하여 정리한 마이크로노즐 내부 centerline의 온도와 SMILE 코드를 이용하여 얻은 결과를 비교하여 거의 일치함을 보임으로써, SMILE 코드의 고고도 노즐 플룸 해석과 관련된 유효성 및 신뢰성을 검증/확인하였다.

SMILE 코드는 Fluent를 비롯한 다른 연속체 해석 코드로부터 starting surface 데이터를 제공받아 coupling하는 기능도 제공하고 있으므로, 고고도에서의 노즐 플룸의 backflow 해석에도 매우 유용하게 쓰일 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. M. S. Ivanov, 2005, "SMILE system USER MANUAL", Institute of theoretical and Applied Mechanics, Russia
2. M. S. Ivanov, 2005, "SMILE system General description of models and methods", Institute of theoretical and Applied Mechanics, Russia
3. Dietmar E. Rothe, "Electron - Beam Studies of Viscous Flow in Supersonic Nozzles", AIAA, Vol 9, No. 5, May, 1971, pp805-811
4. G. A. Bird, "Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows, Clarendon Press, Oxford, 458pp
5. 최영인, "SMILE 코드를 이용한 노즐 플룸 해석", KARI-TAT-TM-2006-006-v.1-rev.1
6. 최영인, "SMILE 코드의 수렴성 확인 절차", KARI-TAT-TM-2006-007-v.1-rev.1.