

DSMC 방법을 사용한 KM 잔류추력 밀도장 시뮬레이션

최영인* · 옥호남** · 홍일희*

Simulation of KM Plume Density Field by Residual Thrust Using DSMC Method

Young-In, Choi* · Honam Ok** · IlHee Hong*

ABSTRACT

The satellite payloaded on the 2nd stage of KSLV-I is planned to perform CCAM(Contamination and Collision Avoidance Maneuver) not to collide with KM(Kick Motor). At the moment, the satellite should pass through low density environment not to be contaminated by KM plume due to residual thrust. Therefore, it is necessary to predict the flow field of KM plume by residual thrust. In this paper, DSMC (Direct Simulation Monte-Carlo) method, which is widely accepted to simulate in rarefied regime, is used to compute the density field of KM plume by residual thrust and the result of DSMC simulation was compared with that of FLUENT to validate it.

초 록

KSLV-I 2단에 탑재된 위성은 KM과 충돌하지 않도록 오염 및 충돌 회피 기동(CCAM)을 수행하게 된다. 이때 위성이 KM 잔류 추력 Plume의 밀도가 충분히 낮은 영역을 통과해야만 오염을 피할 수 있으며, 이를 확인하기 위해서는 Plume 유동장의 정확한 예측이 필수적이다. 본 논문에서는 다양한 회박기체 유동해석에 사용되어 그 정확도가 검증된 DSMC 기법을 사용하는 러시아 ITMA 연구소의 SMILE Code를 이용하여 위성과 분리된 KM의 잔류추력에 의한 Plume의 밀도장을 시뮬레이션 하여 분포를 예측하였고, 그 결과의 신뢰성을 확인하기 위하여 KM 노즐 내부의 밀도장은 Fluent의 결과와 비교하여 그 타당성을 입증하였다.

Key Words: KSLV-I, KM(킥모터), Residual Thrust(잔류추력), CCAM(오염 및 충돌 회피기동), Plume(화염), DSMC method(DSMC 방법), SMILE code(SMILE 코드)

1. 서 론

KSLV-I 2단에 탑재된 위성은 KM의 연소가 종료되면 2단으로부터 분리되어야 하지만, KM 연소실 내에 적층된 slag에 의하여 단열재인 EPDM가 녹으면서 잔류추력이 발생하기 때문에,

* 한국항공우주연구원 나로호기술경영팀

** 한국항공우주연구원 열공력팀

† 교신저자, E-mail: choinkari@kari.re.kr

2단과의 충돌 및 잔류추력으로 인한 오염이 없는 영역을 통과하기 위하여 KM 연소 종료 후 일정 시간이 지난 뒤에 분리될 예정이다. 또한 위성은 2단의 KM과 충돌하지 않기 위하여, 자체적으로 오염 및 충돌 회피 기동 (Contamination and Collision Avoidance Maneuver, CCAM)도 수행한다. 이때 위성은 반드시 KM 잔류 추력 Plume의 밀도가 충분히 낮은 영역을 통과해야지만이 오염을 피할 수 있는데, 이를 확인하기 위해서는 KM 잔류추력 Plume 유동장의 정확한 예측이 필수적이다. 하지만, 위성 분리 고도가 300 km에 이르는 고고도이고, 잔류 추력 구간에서의 KM 연소실 압력 및 밀도 역시 높지 않음을 고려하면, 지금까지 일반적으로 사용되는 CFD 해석기법인 연속체 방정식을 이용한 Plume 유동장 해석은 이용할 수가 없기 때문에, 고고도 희박기체영역에 맞는 해석기법이 사용되어야한다. 본 논문에서는 지금까지 다양한 희박기체 유동해석에 사용되어 그 정확도와 신뢰성이 세계적으로 검증된 러시아의 ITAM 연구소에서 개발한 DSMC(Direct Simulation Monte-Carlo) 방법을 사용하는 SMILE[1] 코드로 위성 분리 순간의 KM 잔류추력 Plume 밀도 분포를 예측하고자 하였다. 계산 초기에 필요한 KM 연소실 조건은 적층된 Slag가 10.2 kg일 때를 기준으로 하였으며[2], SMILE 코드의 초기 입력값으로 사용될 KM 노즐 출구에서의 파라미터들을 얻기 위한 KM 연소실 및 노즐 내부 유동 해석은 연속체 유동장 해석에 사용되는 RANS (Reynolds -Averaged Navier-Stokes) 방정식 해석 기법으로 상용프로그램인 FLUENT를 이용하여 해석하였다. 특히 KM 노즐 내부 유동의 경우 두 가지 기법 (FLUENT, SMILE)의 해가 모두 존재하므로, 두 결과를 비교하여 그 정확도 및 신뢰성의 상호 검증도 수행하였다.

2. 계산 조건 및 방법

2.1 계산 초기 조건 설정

퇴적된 Slag의 복사열로 인해 단열재인 EPDM이 열분해 되면서 Gas를 발생시키며 그 주요 성분은 Methane, Ethane, 그리고 Ethylene으로 구성된다[3]. Fig. 1에는 발생 Gas의 온도에 따른 성분 구성을 표시하였다.

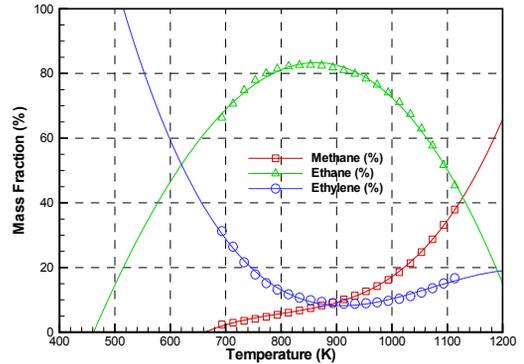


Fig. 1 Change in Gas Composition of EPDM according to Temperature

KM과 2단의 분리는 KM 연소 종료 후 120초에 일어나는 것으로 가정하였으며, 보수적인 계산을 위해 Slag 적층량을 최대인 10.2 kg으로 할 경우 연소실 조건은 압력 234 Pa, 온도 471.4 K임을 알 수 있다[2]. Fig. 1에서 기호로 나타낸 것은 자료가 있는 점을 의미하며, 실선은 3차 방정식으로 근사한 값을 나타낸다. 계산 조건 연소실 온도에서는 성분비에 대한 자료가 주어지지 않은 관계로, 주어진 자료를 외삽 (Extrapolation)하였다. 그 결과 연소실의 온도가 471.4 K일 경우 EPDM의 열분해로 인하여 발생하는 기체는 Ethylene 뿐이라고 가정할 수 있다.

2.2 계산 방법

Ethylene을 사용한 KM 잔류추력 plume 시뮬레이션은 크게 2가지로 나뉘어 수행하였다. 첫째는 노즐 내부유동(연소실, 혹은 노즐목에서 노즐 출구까지)이며, 두 번째는 노즐 외부유동(노즐 출구에서 노즐목 기준 100 m까지)이다.

노즐 내부유동은 KM 잔류추력에 의한 plume

의 밀도가 다소 높기 때문에 FLUENT를 이용한 RANS 방정식 해석기법과 SMILE 코드를 이용한 DSMC 방법으로 각각 계산한 뒤, 그 결과를 비교하였다. 하지만, 노즐 외부유동해석의 경우, 고도 300 km의 고고도 희박기체영역이므로, SMILE 코드를 통해서만 시뮬레이션을 수행하였다.

3. 유동 해석 결과

3.1 노즐 내부유동 비교

Figure 2 에서는 FLUENT의 RANS 방정식을 이용하여 해석한 노즐 내부유동의 밀도장(실선)과 SMILE 코드의 DSMC 방법을 사용하여 얻는 밀도장(점선)의 결과를 비교한 것이다.



Fig. 2 Comparison of Density Contour Result between RANS and DSMC

KM 노즐목에서부터 노즐출구까지의 밀도를 비교한 결과, 노즐목에서부터 노즐의 중간지점까지는 거의 유사한 결과를 보여주고 있고, 중간 이후지점에서는 DSMC 방법이 RANS 방정식에 비하여 보수적인 결과를 보여주고 있다.

3.2 노즐 외부유동 비교

Figure 3에서는 RANS 방정식을 이용하여 구한 KM 노즐출구에서의 파라미터들을 초기값으로 사용하여 DSMC 방법으로 노즐목 기준, X축과 Y축 각 100 m까지 확장하여 해석한 밀도장이다. 총 550만개의 모사입자가 사용되었고, 110만 번의 timestep을 통하여 계산의 수렴성을 확인하였다.

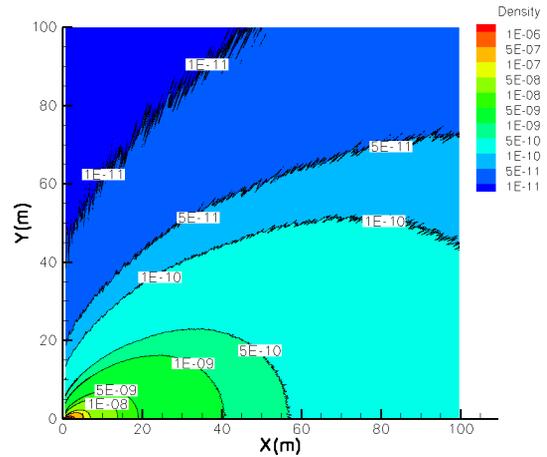


Fig. 3 Density Field from Nozzle Throat to 100 m

4. 결 론

KM 연소실 내 slag 적층량이 10.2 kg인 경우를 계산 조건으로, KM 연소종료 후 120 초에서의 잔류추력 plume 밀도장을 RANS 방정식 및 DSMC 방법을 이용하여 노즐내부의 유동을 해석한 뒤, 노즐 출구에서의 파라미터들을 SMILE 코드의 초기조건으로 사용하여 노즐목 기준 X축, Y축 100 m까지 확장하여 밀도장을 해석하였으며, 이를, CCAM 예측의 기초자료로 제공하였다.

향후 KM 연소실 내 압력과 온도가 더 높은 경우에 대해서도 DSMC 방법을 이용한 추가 시뮬레이션을 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. M. S. Ivanov, G. N. Markelov, S. F. Gimelshein, "Statistical simulation of reactive rarefied flows: numerical approach and application," AIAA Paper 98-2669
2. 나한비, "KSLV-I KM 잔류추력 예측," DR14520PA00000-0008, 2007
3. 나한비, "KM 작동환경에서의 잔류추력 가스 성분 조사", DR14520PA00000, 2007