

킥모터 슬래그 적층에 대한 수치해석

장제선*, 김병훈**, 조인현***

Numerical Analysis for Slag Deposition in the Kick Motor

Je sun Jang*, Byung-Hun Kim**, In-Hyun Cho***

Abstract

Slag mass deposition was required to predict performance accurately of KSLV-I kick motor(KM) system. The validation of the numerical analysis was performed with mass flow rate measured at 4th ground test of the KM. The study described here included internal flow field of KM at various time steps during burning. Slag mass accumulation was computed through the aluminum oxide particle paths to deviate from the gas flow streamlines in flight. These numerical analysis was performed with Fluent 6.3 program. The effects for the acceleration, origins and diameters of the aluminum oxide particles was analyzed, finally the total slag mass accumulation was acquired. We confirmed that the slag mass deposition was agreement well with predicted slag mass based on kick motor the grounded test.

초 록

KSLV-I의 상단부 킥모터의 정확한 성능예측을 위해서 슬래그 적층량을 예측하였다. 수치해석의 타당성을 확인하기 위해 KM 4호기의 질유량에 대한 시험값을 비교하였다. 비행 중 KM 슬래그 적층해석을 위해 각 시점별 내부유동 현상을 해석하였다. 알루미늄 액적의 궤적을 통해 슬래그가 모터 내부에 적층되는 현상을 나타내었다. 유동현상 및 액적의 적층 현상을 Flunet 6.3을 사용해서 수치해석을 수행하였다. 슬래그 적층량을 예측하는데 비행중의 가속도, 액적 출발점 위치, 액적의 크기 등에 대한 영향을 분석하였고 이를 고려하여 총 슬래그양을 예측하였다. 이 예측값을 지상시험 결과를 이용해서 예측되는 슬래그양과 비교하였다.

키워드 : 슬래그(slag), 알루미나(alumina), 추진제(propellant), 킥모터(kick motor), 고체모터(solid motor), 연소가스(combustion gas)

접수일(2007년12월18일), 수정일(1차 : 2008년 10월 23일, 2차 : 2008년 10월 27일, 게재 확정일 : 2008년 11월 1일)

* 추진제어팀/aerototoro@kari.re.kr

** 추진제어팀/bhk@kari.re.kr

*** 추진제어팀/ihcho@kari.re.kr

1. 서 론

고체모터에서 추진제가 연소될 때 알루미늄 성분이 Al_2O_3 (산화알루미늄)인 액적으로 배출된다. 액적의 상당한 양이 연소가스의 유선을 따라 노즐로 배출되지 못하고 모터 내부에 적층된다. 적층된 액적을 '슬래그'라고 한다. 슬래그가 모터 내에 존재하면 고체모터 내열 성능 저하의 주요 원인이 된다. 또한 후방동 내의 온도가 상승되고 내열재가 열분해 되면서 잔류추력이 발생한다.[1],[2],[3] 이와 같이 모터내의 슬래그가 적층되면 전체 시스템에 문제가 발생하므로 정확한 슬래그양을 파악해야한다. 하지만 KSLV-1 KM의 경우 슬래그에 대한 고체모터의 비행시험 자료가 없다. 고체모터 슬래그 시험으로 대표적으로 알려진 비행시험 결과도 모터의 크기, 형상, 운행조건이 다르기 때문에 KM에 바로 적용시키기에 어려움이 있다. 이 연구의 최종 목표는 슬래그가 적층되는 과정에 대한 연구로 정확한 슬래그양을 수치해석을 통해 예측하는 것이다.

2. 본 론

2.1 KM 지상시험 유동해석

2.1.1 해석방법

연소시간에 따른 추진제 형상의 변화를 고려해서 유동해석에 필요한 모델로 단순화 시켰다. CFD 격자 생성은 Gambit을 사용하였다. 지배방정식으로 정상, 압축성, 2차원 Navier-Stoke's 방정식을 적용하였으며, 공간에 대한 차분은 2차 풍상차분법을 사용하였다.

2.1.2 해석조건

연소가스의 물성치는 추진제에 대한 CEA 계산을 통해 구하였다.[4] 표1은 해석할 연소시점에서 모터 내부압력과 연소가스 물성치이다. 연소가스는 이상기체로 가정한다.

노즐 출구 뒤쪽으로 외부 유동영역까지 모델링하였다. 노즐 출구를 압력 경계조건으로 설정

했을 때 계산이 발산하는 경우가 많았고 충격파에 의한 압력유지가 힘들었다. 따라서 외부 영역까지 확장시켜 계산하였다. 축대칭 형상이므로 2차원 단면으로 모델링 하였다. 연소시작 후 54초 일 때의 KM 해석영역과 경계조건은 그림1에 나타내었다.

노즐 영역에서는 속도가 급격히 증가하고 초음속 유동으로 바뀐다. 따라서 노즐 확장부와 슬래그가 적층되는 케이스 후방부에는 정렬격자를 사용하였고 그 외의 영역에서는 비정렬격자를 이용했다. 또한 노즐 목과 노즐벽면에 격자를 집중시켰다.

표 1. 모터내부 경계조건과 연소가스 물성치

Time (sec)	Pressure (bar)	Temperature (K)	Cp (J/kg-K)	Thermal Conductivity (W/m-K)	Viscosity (kg/m-s)
12	71.122	3467.13	2027.1	0.412	9.993e-05
33	52.523	3440.74	2024.7	0.410	9.940e-05
54	37.049	3409.27	2022.0	0.407	9.877e-05



그림 1. KM 경계조건



그림 2. 54sec 격자계

2.2 KM 지상시험 유동 해석결과

2.2.1 지상시험 내부 유동 해석 결과

연소가스의 물성치를 equilibrium, frozen 상태, 노즐목 삭마 조건을 고려해서 유동해석을 수행하고 질유량값을 비교하였다(표2). 이때 노즐목 삭마량과 frozen상태라고 가정했을 때 질유량이 시험값과 가장 작은 차이를 보였다. Ref. 값은 CEA 계산을 통해 예측한 값이다. KM 지상시험 4호기의 결과 온도-압력(그림3), 온도-추력(그림4) 그래프와 CEA 계산 예측값을 비교해서 기준치로 정하였다. 지상시험 4호기 충전체는 비행용 규격으로 제작, 시험 되었다. 따라서 비행용 KM과 같은 성능을 보인다고 가정한다.

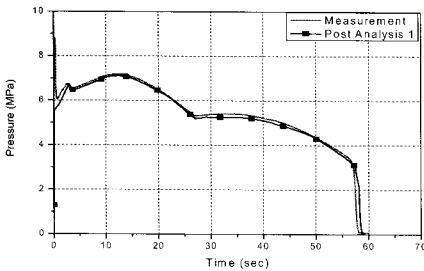


그림 3. 54sec GT #4 압력 예측값 계측값 비교

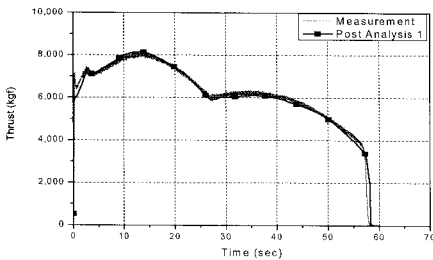


그림 4. GT #4 추력 계측값 압력값 비교

표 2. 질유량 값 비교

Time (sec)	Pressure (bar)	Case	Mass flow rate (kg/sec)
54	37.049	Equilibrium	15.10(-23.04%)
		frozen	15.59(-20.53%)
		노즐목 삭마	17.78(-9.39%)
		노즐목 삭마 + frozen	18.963(-3.35%)
		Ref. (CEA 계산[4])	19.620

12초 때의 온도 선도(그림5)와 GT 3호기의 연소시험 사진(그림6)을 비교해 보았을 때 충격과 발생으로 인한 온도변화 분포가 유사한 경향을 가지는 것을 알 수 있다.

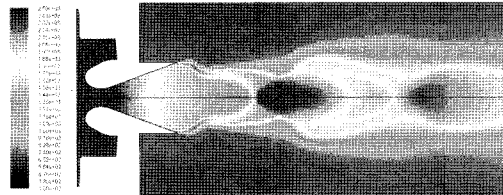


그림 5. t=12sec 온도선도

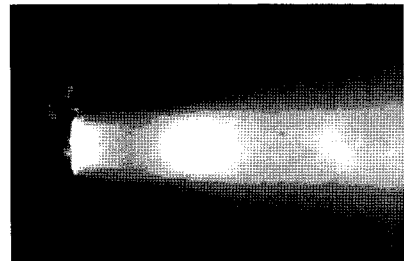


그림 6. GT #3 연소시험 사진(12sec)

그림7,8은 KM의 마하수, 온도에 대한 선도를 나타내었다. 아음속 유동은 노즐 면적이 좁아짐에 따라 노즐 목에서 쇼크되고 노즐 면적이 증가하면서 초음속 유동으로 가속된다. 노즐 끝단에서 경사충격파가 발생되고 경사충격파 끝이 만나는 지점에서 mach disc가 생기며 다시 반사충격파가 나오는 것을 볼 수 있다.

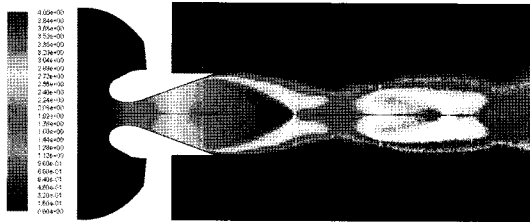


그림 7. 마하수 선도(54sec)

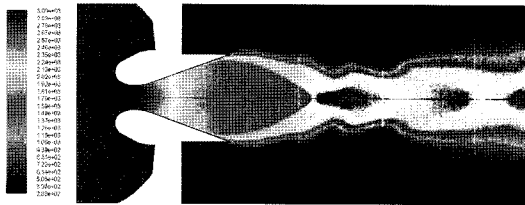


그림 8. 온도 선도(54sec)

속도 벡터(그림9)를 통해 재순환영역이 노즐 잠입부의 상부 후방 연소관 부위에 형성되는 것을 알 수 있다. 연소가스 pathline(그림10)을 통해서 연소가스의 궤적을 알아보았다. 연소가스는 대부분 노즐을 통해서 빠져 나가지만 dead-zone에서는 액적이 적층될 것이라고 예상할 수 있다.

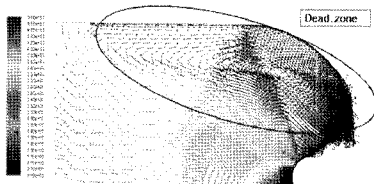


그림 9. 속도 벡터

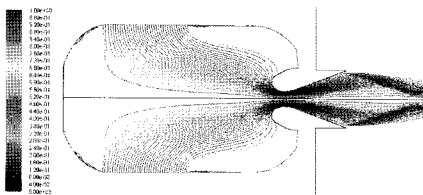


그림 10. Path-line 선도

2.2.2 난류모델에 따른 유동해석 결과

적합한 난류모델을 선정하기 위해서 standard $\kappa-\epsilon$, realizable $\kappa-\epsilon$, Spalart -Allmaras, SST $\kappa-\omega$ 난류모델에 따른 질유량 값을 비교하였다(표3). SST $\kappa-\omega$ 난류모델이 시험값과 가장 유사하였다.

표 3. 난류모델에 따른 질유량 비교

Time (sec)	Press. (bar)	Turbulence Model	Mass flow rate (kg/sec)
54	37.049	Standard $\kappa-\epsilon$	17.780(-9.39%)
		realizable $\kappa-\epsilon$	15.589(-5.25%)
		Spalart-Allmaras	18.353(-6.46%)
		SST $\kappa-\omega$	18.963(-3.35%)
		Ref.(CEA 계산[4])	19.620

2.3 KM 비행모델 유동해석

2.3.1 FM 해석조건

비행용 KM 유동해석 조건은 지상용 해석모델과 동일한 지배 방정식과 물성치를 사용하였다. KM 지상용 모델의 해석결과와 시험값의 질유량 값이 가장 유사한 SST $\kappa-\omega$ 난류 모델을 사용하였다. KM 지상용 모델의 유동 해석에서는 노즐 목 삭마량을 고려하고 frozen 상태라고 가정했을 때 질유량이 시험값과 가장 적은 차이를 보였다. 따라서 연소가스의 물성치는 frozen 상태라고 가정하였다. 그러나 노즐목 삭마는 슬래그 적층 패턴에 큰 영향을 주지 않으므로 고려하지 않았다. KM 케이스 형상에서 노즐까지 이어진 해석 모델을 단순화했다.(그림11) 후방 돔 영역의 내열재 형상으로 생긴 단 부분을 고려하였다. 노즐 팽창비는 35로 비행모델 설계를 기준으로 했다. 슬래그 적층해석에서는 노즐 바깥영역은 고려하지 않았다. 축대칭 형상이므로 2차원 단면으로 모델링하였다. 연소시점 51초일 때의 해석영역과 경계 조건은 그림11에 나타내었다.

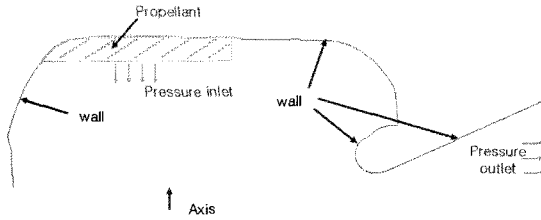


그림 11. 유동해석 영역 및 경계조건

연소시점 12초에서 57초까지의 연소가스에 대한 압력, 온도, 비행 중 KM에 작용하는 가속도, 연소가스 열전도율과 점도를 표4에 나타내었다. 물성치 및 해석 조건은 CEA[4] 계산을 이용하여 구하였다.

노즐 확장부와 케이스 후방부에는 정렬격자를 사용하였고 그 외의 영역에서는 비정렬격자를 이용했다. 적층되는 슬래그 해석을 위해서 연소관 후방부, 노즐 상단부 위주로 격자를 집중시켰다. 또한 속도변화가 큰 노즐 목과 노즐 벽면에 격자를 집중시켰다. 그림12~18은 각 해석시점에서 해석영역에 따른 격자계이다. 연소시점 12초부터 57초까지 해석영역은 추진체가 연소되면서 변한다. 슬래그 적층은 연소시점 후반에 일어난다고 알려져 있으므로 해석시점을 후반에 집중시켰다.

표 4 연소가스 물성치

Time (sec)	Press. (bar)	Temp. (K)	Axial acc.(g)	Cp (J/kg-K)	Thermal Cond. (W-m-K)	Viscosity (kg/m-s)
12	71.122	3467.13	5.0882	2027.1	0.4123	9.993e-5
24	57.737	3450.00	5.4590	2026.0	0.4110	9.970e-5
33	52.523	3440.74	5.8690	2024.7	0.4102	9.940e-5
45	47.753	3432.26	7.2632	2024.0	0.4095	9.923e-5
48	45.281	3427.49	7.5016	2023.6	0.4091	9.913e-5
51	41.818	3420.31	7.5596	2023.0	0.4086	9.899e-5
54	37.049	3409.27	7.5127	2022.0	0.4077	9.877e-5
57	31.701	3394.87	7.0844	2020.9	0.4065	9.848e-5

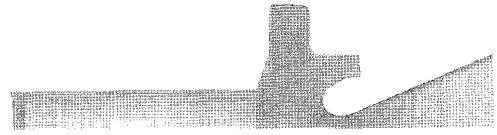


그림 12. t=12sec 격자(51632)



그림 13. t=24sec 격자(61272)



그림 14. t=33sec 격자(63335)

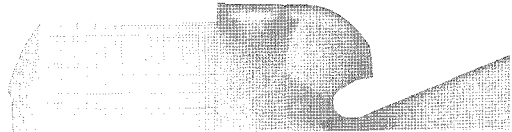


그림 15. t=45sec 격자(63333)

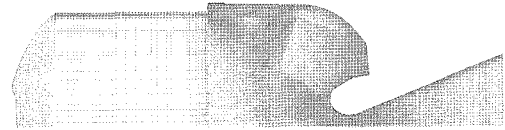


그림 16. t=48sec 격자(63400)

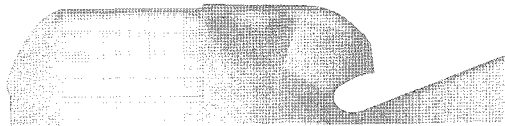


그림 17. t=54sec 격자(66598)



그림 18. t=57sec 격자(72417)

2.3.2 KM 비행모델 유동해석 결과

압축성 정상 유동으로 내부 유동장을 수립시켰다. 유동장 변수의 residual이 $1e-3$ 까지 떨어지고 그 이후에는 더 감소하지 않고 지속적으로 진동한다.(그림19) 모든 해석조건에서 전체 residual이 $1e-3$ 이하가 나올 때까지 반복계산(iteration)하였다. 또한 노즐 끝단 출구에서 질유량 값이 일정한 값에 도달(그림20)하는 것으로서 수렴성을 판단하였다.

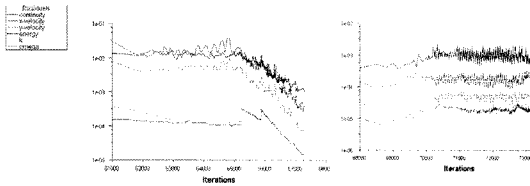


그림 19. Residuals

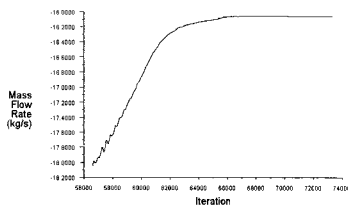


그림 20. 출구 질유량

연소가스 path-line은 추진제 표면을 출발점으로 연소가스가 지나가는 경로를 나타낸다. 12초에서 24초 사이에서는 후방돔 부근에 추진제가 많이 남아있다. 따라서 내부 유동장과 높은 압력구배로 인해 슬래그가 적층되는 dead-zone이 거의 생기지 않는다.(그림21~24) 33초 이후에는 후방돔에 남아있는 추진제가 연소되고 dead-zone이 본격적으로 생기기 시작한다.(그림25~26) 48초일 때 후방돔 영역에 와류(vortex flow)가 생성되어 51초에서는 그 크기가 커진다.(그림29~32) 또한 내열재 단에 의해 케이스 근접한 거리에서는 작은 vortex flow가 생성된다.(그림28,30,32) 54초일 때는 vortex가 케이스 후방 뒤쪽으로 이동한

다.(그림33~34) 57초일 때는 압력이 크게 떨어지면서 dead-zone 영역이 확장되고 vortex 반경 크기가 커졌다.(그림35~36) 내부 압력과 남은 추진제의 형상에 따라 내부 유동 패턴이 변화한다. 따라서 vortex의 강도, 크기, 위치에 따라서 액적이 노즐을 통해서 빠져나가거나 케이스 후방에 적층될 것이다



그림 21. 12sec 속도벡터

그림 22. 12sec 계적

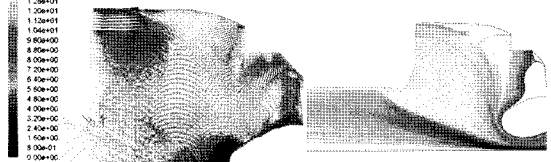


그림 23. 24sec 속도벡터

그림 24. 24sec 계적

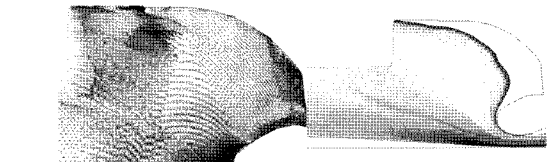


그림 25. 33sec 속도벡터

그림 26. 33sec 계적

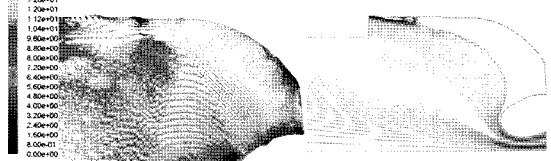


그림 27. 45sec 속도벡터

그림 28. 45sec 계적

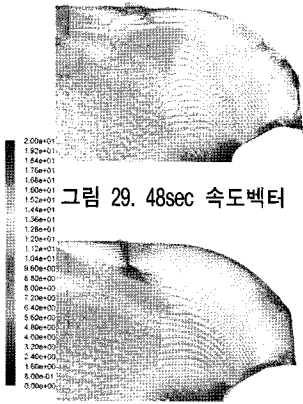


그림 29. 48sec 속도벡터



그림 30. 48sec 궤적

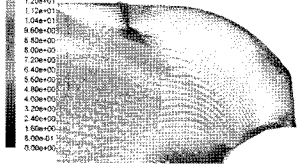


그림 31. 51sec 속도벡터

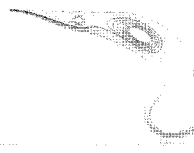


그림 32. 51sec 궤적

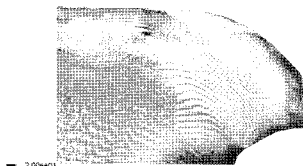


그림 33. 54sec 속도벡터



그림 34. 54sec 궤적

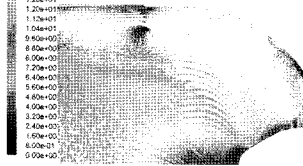


그림 35. 57sec 속도벡터



그림 36. 57sec 궤적

2.4 슬래그 적층 해석

2.4.1 알루미늄 액적

추진제가 연소될 때 알루미늄 성분은 산화알루미늄(Al_2O_3)으로 변환한다. 시험에 의하면 추진제 연소에 의한 알루미늄 액적의 크기 분포는 크게 2부분으로 나누어진다.[6] $5\mu m$ 이하의 알루미늄 액적이 전체 알루미늄 무게의 70-80%를 차지하고 연소압력 및 추진제 성분에 관계없이 평균 직

경이 $1.5\mu m$ 로 알려져 있다. 그 외의 잔여 알루미늄 액적은 $40-200\mu m$ 이고 액적의 크기 분포는 추진제 성분 및 연소압력에 따라 달라지며 전체 알루미늄 무게의 20-30%를 차지한다고 알려져 있다.[5],[6] 알루미늄 액적이 small size인 $5\mu m$ 이하인 것은 smoke 형태로 연소가스의 궤적을 따라 대부분 노즐로 빠져 나온다. 반면에 large size 액적은 관성력의 영향으로 KM 내부에 적층된다. 적층되는 슬래그 양을 계산하기 위해서 먼저 각 연소시점에서의 액적의 크기분포와 발생량을 알아야 한다.

추진제 연소에 의한 large size의 알루미늄 액적 사이즈(Aluminum agglomerate = D_{ag})는 AP계열의 추진제의 경우 다음과 같은 계산식(1)을 이용하여 구한다.[6]

$$D_{ag} = 34.12 / (f_s^2 \times r) \quad (1)$$

f_s = solid fraction in the propellant

(Al + AP)

r = burn rate (inch/sec)

알루미늄 액적 크기는 액적이 연소실에서 노즐방향으로 이동할 때 증발하여 실제 크기보다 감소한다. 알루미늄 액적 크기의 감소비율은 연소 압력에 따라 변하며 일반적으로 0.6에서 0.8 범위로 알려져 있다. 키크모터의 경우는 감소비율을 0.74로 가정하고 액적의 직경을 계산하였다. 각 연소시점에서 large size의 알루미늄 액적의 평균 직경(D_m)은 표5와 같다. 알루미늄 액적의 크기는 연소속도에 반비례하므로 압력이 낮아지는 연소 말기에는 알루미늄 액적의 평균 직경이 크게 증가한다.(연소속도 상수 $a=0.03937$, 압력지수 $n=0.3319$ [4])

표 5 알루미늄 평균액적 사이즈

연소 시점 (sec)	KM 내부 압력 (bar)	연소속도 (mm/sec)	알루미늄액적 사이즈 $D_m(\mu\text{m})$
12	71.1220	7.4709	141.0948
24	57.7376	6.9714	151.2039
33	52.5232	6.7558	156.0294
45	47.7538	6.5457	161.0380
48	45.2811	6.4312	163.9050
51	41.8188	6.2636	168.2898
54	37.0495	6.0169	175.1921
57	31.7008	5.7135	184.4955
59	0.2508	1.1463	919.510

다음의 식을 이용하여 large size 알루미늄 액적 크기 분포를 계산하였다.[6]

$$f(D) = 0.5 [1 + \text{erf}(Z/\sqrt{2})] \quad (2)$$

$$Z = (1/\sigma) \log_{10}(D/D_m)$$

erf = error function

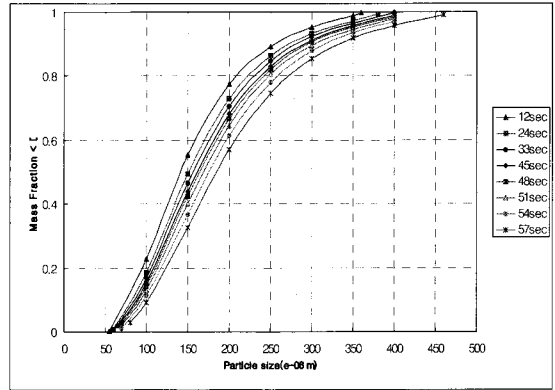
$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$$

$\sigma = 0.2$ (표준편차)

D_m = 액적의 평균직경 크기이다.

식2를 이용하여 연소시점에 따른 액적 크기 누적분포를 그림37에 나타내었다. 연소시점이 뒤로 갈수록 액적크기가 점점 커지는 경향 보인다. 표6은 키크모터 내부유동 해석을 통한 연소가스 질유량 값, Al_2O_3 의 전체 질유량과 large size droplet 질유량이다. 연소가스 질유량 중 Al_2O_3 (산화알루미늄)의 양은 CEA 계산[4]을 통해 각 연소시점에서 전체 연소가스에 대한 Al_2O_3 의 질량 분율로 구하였다. 전체 연소가스 질량에 대한 Al_2O_3 의 질량 분율은 연소압력에 따라 작은 차이가 있지만 약 30%로 일정하다고 볼 수 있다. 키크모터의 경우는 $5\mu\text{m}$ 이하의 알루미늄 액적의 무게가 75%, 그 외의 큰 알루미늄액적의 무게가 25%라고 가정하였다. 이러한 가정을 이용해서

연소시점에 따라 추진제 표면에서 나오는 large drop Al_2O_3 질유량을 구하였다.(표6)


그림 37. large size 알루미늄 액적 크기 분포
표 6 알루미늄 액적 질유량

연소 시점 (sec)	연소가스 질유량 (kg/sec)	Al_2O_3 질유량 (kg/sec)	large drop Al_2O_3 질유량 (kg/sec)
12	30.6556	9.2665	2.3166
24	27.2460	8.2359	2.0589
33	22.6964	6.8606	1.7151
45	20.6493	6.2412	1.5603
48	19.5877	5.9180	1.4795
51	18.1026	5.4663	1.3666
54	16.0589	4.8454	1.2113
57	13.7583	4.1464	1.0366

KM 연소실 내의 온도가 약 3000~3500K로 예상되는데 이러한 고온 환경조건에서 산화알루미늄(Al_2O_3)의 물성치를 찾기가 쉽지 않다. 따라서 액적의 밀도는 2327~2823K 범위내에서 측정된 데이터를 이용해 추정된 결과를 사용하였다.[5],[6]

$$\text{밀도} : 1.6 \text{ g/cc } (=1600 \text{ kg/m}^3)$$

알루미늄 액적의 비열(specific heat, c_p)은 2120 ~2450K 범위 내에서 측정된 데이터를 이용

하여 구하였다. 비열은 온도의 함수이나 연소 시점에 따른 KM 내부 온도 변화가 크지 않으므로 $T=3400K$ 일 때 값을 구하였다.[7]

$$c_p : 1538.1159 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

알루미늄 액적 적층 해석을 위해 Fluent의 Discrete Phase Models를 사용하였다. 각 연소시점에서 FM내부의 연소가스 유동이 정상상태라고 가정하고 알루미늄 액적의 궤적을 통해 적층량을 구하였다. 알루미늄 액적 입자들은 추진제 표면을 출발해서 연소가스 유동의 영향을 받고 액적의 크기와 위치에 따라 이동 궤적이 변화한다. 일반적으로 알루미늄 액적의 크기가 작을수록 연소가스의 유선을 따라 노즐로 잘 빠져나간다. 반면 액적의 크기가 커지면 연소가스의 유선을 따라가지 못하고 모터 내부 표면에 적층된다. 특히 잠입형 노즐의 경우는 노즐형상의 영향으로 모터 케이스 후방에 재순환영역이 발생하게 되는데 액적이 재순환 영역 근처에서 연소가스 유선의 급격한 방향전환을 따라가지 못하면 벽에 적층된다.

슬래그 해석을 위해서 아래 그림38과 같이 액적이 적층되는 표면을 케이스 후방 돔 적층영역(trapped wall-I)과 노즐입구 적층영역(trapped wall-II)을 정의해서 이 영역에 부딪치는 액적입자의 총 적층량을 구하였다.

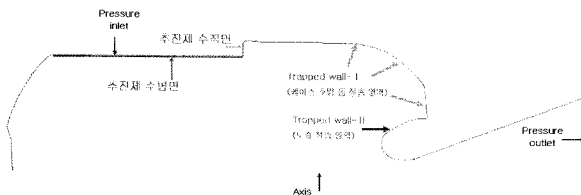


그림 38. 슬래그 적층 해석 / 경계 조건

2.4.2 슬래그 해석 결과

KM이 축방향으로 받는 가속도를 고려했을 때, $a=0$ 일 때 보다 슬래그 적층량이 증가했다.(그림

39-40) 액적의 크기가 커짐에 따라 액적에 작용하는 가속도 영향이 커진다. 따라서 액적이 연소가스의 유선을 따라 가지 못하고 케이스 후방 또는 노즐 입구면에 적층된다. 3시점(24초, 48초, 54초)에서 비행 중의 가속도가 작용할 때 슬래그 적층량은 약 1.5~2배 증가하였다.(표7)

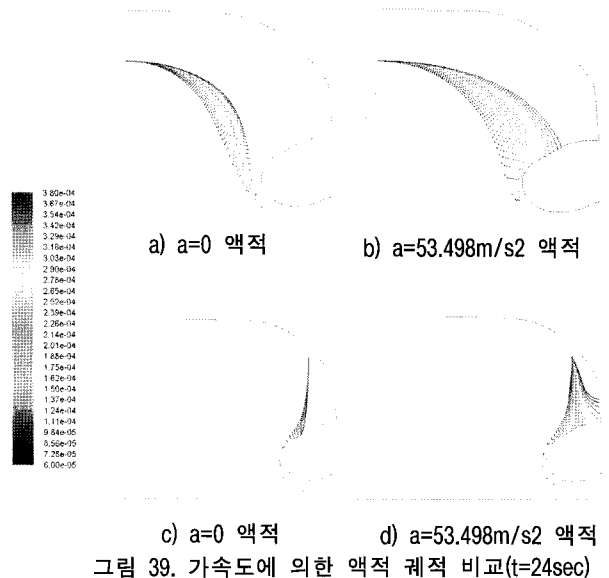


그림 39. 가속도에 의한 액적 궤적 비교(t=24sec)

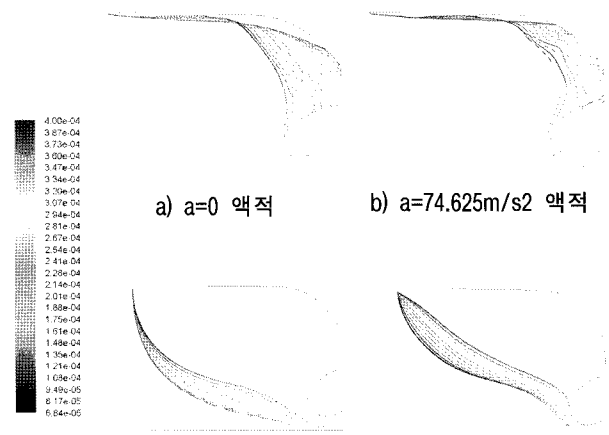


그림 40. 가속도에 의한 액적 궤적 비교(t=54sec)

표 7 가속도 영향에 대한 슬래그 적층량 비교

연소시점 (sec)	24		48		54	
가속도 (m/s ²)	53.498	-	73.516	-	73.625	-
후방돔 적층량(kg)	0.103	0.041	0.230	0.136	0.135	0.042
노즐입구면 적층량(kg)	0.071	0.083	0.037	0.008	0.008	0.052
전체적층량 (kg)	0.175	0.125	0.267	0.145	0.144	0.095

Al_2O_3 액적 크기에 따른 궤적을 알아보았다. 직경이 $5\mu m$ 인 Al_2O_3 액적은 케이스 후방돔 영역에서 연소가스와 같이 노즐을 통해 빠져나간다. 직경이 $5\mu m$ 이하의 액적은 smoke로 알려져 있으며 대부분이 적층되지 않고 후방돔에서 급격한 방향전환을 통해 노즐로 빠져나올 수 있다.(그림41) 반면 직경이 $174\mu m$ 일 때는 추진제 표면에서 케이스 후방돔으로 떨어져 나간 액적이 연소가스와 같이 방향전환을 하지 못하고 케이스 내부에 적층된다.(그림42) 즉 같은 위치에서 출발하는 액적도 액적 크기에 따라 이동경로가 달라지므로 슬래그 적층량 예측에 중요한 변수가 된다.

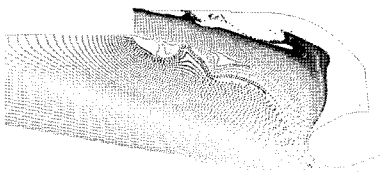


그림 41 직경 d=5mm 액적(45sec)

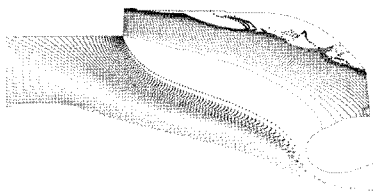


그림 42. 직경 d=174mm 액적(45sec)

그림43은 연소시점 45초일 때 액적의 초기 위치에 따른 액적의 궤적이다. 알루미늄 액적이 나오는 위치에 따라 액적의 이동경로가 달라지며 같은 지점에서도 액적의 직경에 따라 이동경로와 적층되는 위치가 달라진다. 액적의 크기가 클수록 연소가스의 궤적을 따라 나가지 못하고 가속도 방향으로 직선이동해서 후방돔 영역에 적층된다. 추진제 수직면에서 발생하는 액적은 직경 크기가 상대적으로 클수록 후방 돔 영역에 적층되고 작을수록 노즐로 빠져나오거나 노즐 입구면에 적층된다. 추진제 수평면에서 나오는 액적의 대부분은 노즐을 통해 밖으로 나간다. 즉 연소시점에서 액적의 크기 분포에 따라 슬래그 적층량이 달라진다.

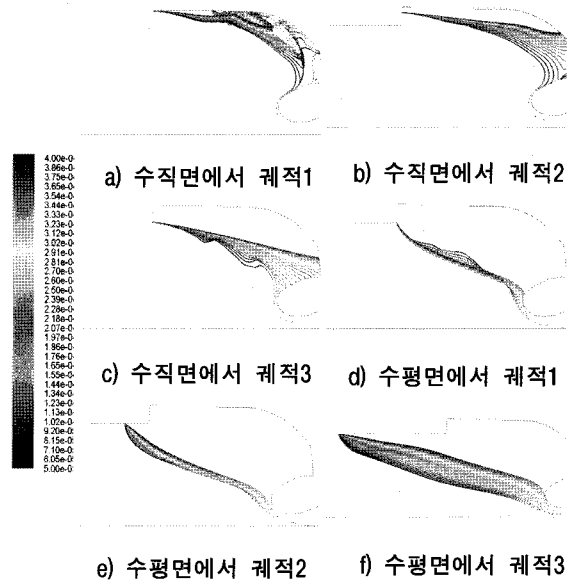


그림 43. 위치에 따른 액적 궤적

추진제 표면 위치에 따라 노즐로 탈출 가능한 액적의 직경 크기가 변한다. 연소시점 45초일 때 남아있는 추진제 수평 표면에서는 추진제 크기 분포에 상관없이 액적이 모두 빠져나갔다. 그러나 수직표면에서는 위치에 따라 빠져나갈 수 있

는 액적의 직경이 변하였다. 이를 해석하기 위해서 추진제 수직 표면을 3부분으로 나누었고 각 부분에서 노즐 탈출 최대직경이 균일하다고 가정하면 아래 그림44과 같이 적층되는 최소 직경을 구할 수 있다.

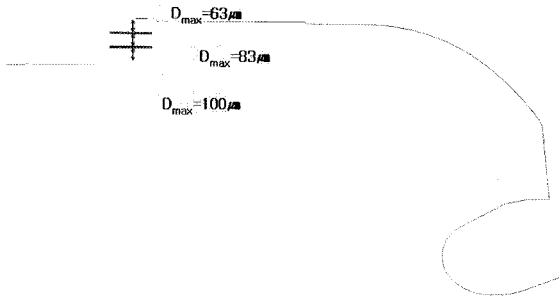


그림 44. 적층되는 최소 직경

연소 종료 시점에 축방향으로 가속도는 0.00255g로 작다. 추진제가 모두 소진되면 갑자기 압력이 감소하고 축방향으로 작용하는 가속도 또한 1초 내외로 7.08445g에서 0으로 급격히 떨어진다. 연소 말기 약 59초일 때 가속도가 갑자기 떨어지기 때문에 그 순간 케이스 내에서 무중력 상태가 되고 대부분의 액적이 빠져나오지 못하고 쌓이게 된다. 따라서 그 시점에서 슬래그의 적층량을 모두 구하기 위해서 KM이 받는 가속도가 급감하기 전 7.084449g라고 가정하였다. 그림45는 가속도가 약 7g일 때 대부분의 액적이 케이스 후방돔과 노즐입구면에 적층되는 것을 보여준다. 59초에서는 KM 내부 압력이 급격히 떨어졌기 때문에 액적의 크기도 연소 전반에 걸쳐 가장 크고 관성력도 크게 받으므로 대부분 액적이 적층되고 크기가 작은 액적의 경우만 노즐을 통해 빠져나간다. 그림46는 가속도가 거의 0이고 후방돔에는 거의 적층되지 않고 노즐 입구면에서 쌓이며 액적은 대부분 노즐을 통해서 나간다. 연소 종료 시점에 급감하기 전의 가속도 7g를 고려하면 가속도가 0일 때보다 적층되는 양이 약 3~4배 증가한다.(표8) 따라서 연소 종료시점에 KM 내부 압력의 급감에 의해 슬래그 대부분이 적층

되는 것을 고려해서 해석에 적용시켜야 정확한 적층량을 예측할 수 있다.

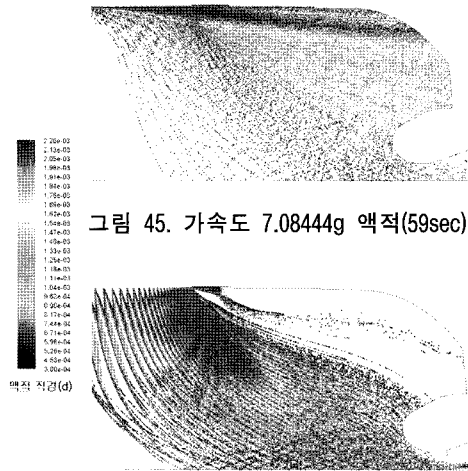


그림 45. 가속도 7.08444g 액적(59sec)

그림 46. 가속도 0.00255g 액적(59sec)

표 8 연소종료 시점(59초) 가속도 영향 비교

가속도(g)	7.0845 (69.4276m/s ²)	0.00255 (0.2495 m/s ²)
후방 돔 slag양(kg)	0.2398	0.0756
nozzle 입구면 slag양(kg)	0.2398	0.0082
총 slag양 (kg)	0.3064	0.0838

전체 연소시간에서 총 슬래그 적층량을 구하기 위해서 각 연소시점(12-57초)에서 슬래그 적층량을 구하였다. 알루미늄 액적은 그림37의 large size 액적 크기 분포를 가지고 표6의 large drop Al₂O₃ 질유량 값을 연소 중 남아있는 추진제 표면에서 공급된다고 가정하였다.

연소시점 12~33초에서 추진제 표면 수평부분에서는 알루미늄 액적 대부분 노즐을 통해서 빠져나간다.(그림47~49) 이때는 노즐목 직경과 알루미늄 액적 시작지점의 반경의 차이가 크지 않고

압력 구배가 높기 때문에 액적이 연소가스의 궤적을 이탈하지 않는다. 하지만 추진제 수직표면에서 발생하는 알루미늄 액적은 연소가스를 따라 노즐을 통해 나가지 못하고 케이스 후방에 적층된다. 따라서 액적이 가속도 영향이 크게 작용하는 것을 알 수 있다. 연소 중반 이후로는 추진제 수평부분에서 나오는 알루미늄 액적 중 직경이 상대적으로 큰 액적은 노즐 입구면에 적층되고 직경이 작을 때는 연소가스 궤적을 따라 노즐로 빠져나간다.(그림50~54)

노즐로 빠져나가지 못하고 적층되는 Al_2O_3 의 질량을 구하였고(표9) 연소시점에 따라 그림55의 분포를 이루었다. 총 연소시간 동안 슬래그 적층량을 적분하여 구하였다. 슬래그의 총량은 약 8.1265kg이며 후반 50초일 때 적층량이 가장 많았다. 이때는 KM 케이스 후방동에 적층되는 양이 총 슬래그 양에 지배적인 역할을 하였다. 반면에 노즐 입구에 쌓이는 양은 연소 초반시점에 큰 비율을 차지하였다.

수치해석 결과와 지상시험을 이용하여 구한 비행시 슬래그 예측량과 비교하였다. GT 3호기 시험결과 노즐부에서 슬래그 퇴적량은 0.240kg으로 측정되었고 총 슬래그량은 0.510kg이다. Star 48의 지상 및 비행 시험 결과를 토대로 KSLV-I KM의 비행시 슬래그 퇴적량을 예측한 결과는 6.8 ± 3.4 kg이었다.[5] 이 슬래그량은 수치해석을 통해 예측된 8.1265kg값과 유사한 것으로 보인다. 또한 연소 중반 약 33초까지 적층된 액적은 다른 유동장이나 액적의 영향으로 적층되었다가 다시 튀어나와서 실제로는 예측된 적층량 보다 작을 것으로 예상되므로 지상시험을 이용하여 구한 예측량과 매우 유사하다.

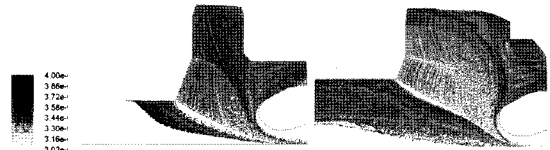


그림 47. 액적(12sec) 그림 48. 액적(24sec)

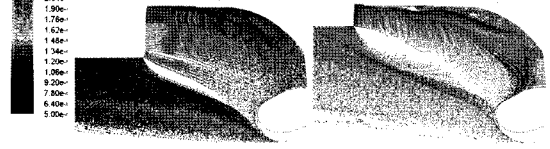


그림 49. 액적(33sec) 그림 50. 액적(45sec)

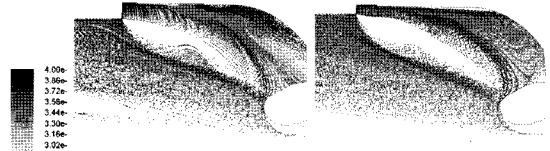


그림 51. 액적(48sec) 그림 52. 액적(51sec)

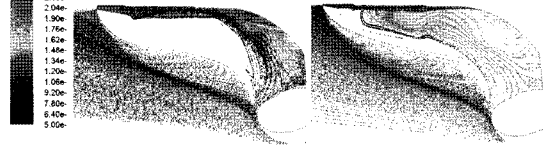


그림 53. 액적(54sec) 그림 54. 액적(57sec)

표 9 연소시점에 따른 슬래그 적층량

연소 시점 (sec)	후방 동 적층량(kg)	노즐 입구면 적층량(kg)	총 slag 적층량(kg)
12	0.03909	0.01564	0.05473
24	0.10330	0.07194	0.17524
33	0.15760	0.03752	0.19512
45	0.15956	0.05621	0.21577
48	0.23030	0.03752	0.26739
51	0.16950	0.01798	0.18927
54	0.13550	0.00851	0.14400
57	0.07560	0.00825	0.08385

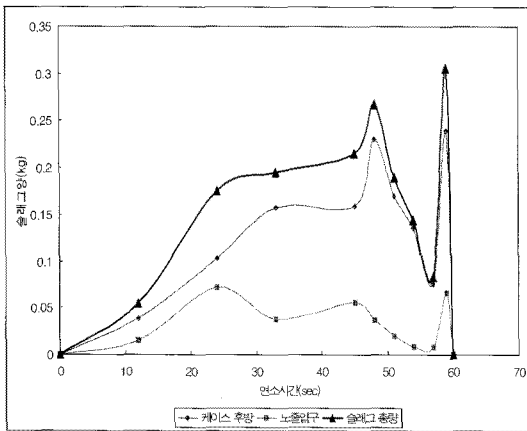


그림 55. 슬래그 적층량

3. 결 론

비행 중 KM 내부 슬래그 적층해석을 수행하였다. 해석 시점에서 남은 추진제 형상을 고려해서 해석 모델을 간단화했다. 해석 시점별로 압력변화를 고려해서 연소가스에 대해 압축성 정상유동해석을 수행하였다. 추진제의 남은 표면에서 액적의 궤적과 적층되는 양을 구하였다. 추진제 성분을 이용해서 산화알루미늄(알루미나) 액적량을 구하고 KM 내부 압력을 고려해서 액적 크기 분포를 구하였다. 케이스 후방돔과 노즐 입구면에 부딪치는 액적이 적층된다는 경계조건을 이용해서 연소시점에서 액적의 양을 구하였다. 연소가 종료되기 까지 총 적층되는 슬래그량은 약 8.1265kg으로 예측되었다. 하지만 연소 중반 약 33초까지 적층된 액적은 다른 유동장이나 액적의 영향으로 적층되었다가 다시 튀어나와서 적층량이 감소될 것으로 예상된다. 슬래그 적층량을 예측하는 데는 비행중의 가속도, 액적 출발점 위치, 액적의 크기가 중요한 인자로 작용하는 것을 알 수 있었다.

수치해석 결과와 지상시험을 이용하여 구한 비행시 슬래그 예측량과 비교하였다. Star 48의 지상 및 비행 시험 결과를 토대로 KSLV-I KM의 비행시 슬래그 퇴적량을 예측한 결과인

6.8±3.4kg와 잘 맞는 것으로 보인다. 이러한 슬래그 적층 해석은 KM 설계에 이용하면 슬래그를 더 감소시킬 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. S. Boraas, "Modeling Slag Deposition in the Space Shuttle Solid Rocket Motor," Journal of Spacecraft, Vol.21, No.1, pp. 47-54, 1984
2. Randall Smith-Kent and Fred Perkins, "A Potential, Two - Phase Flow Model For Predicting Solid Rocket Motor Slag," AIAA 93-2307, pp. 1-15, 1993
3. S. Boraas, "Modeling Slag Deposition in the Space Shuttle Solid Rocket Motors," AIAA 82-1061, pp. 1-15, 1982
4. TR14520PA00000-0006 KM 지상시험 4호기 종합 보고서
5. DR14535PA00000-0004 KSLV-1 KM 비행 시 슬래그 예측
6. Mark Salita, "Deficiencies and Requirements in Modeling of Slag Generation in Solid Rocket Motors", Journal of Propulsion and Power, Vol.11, No.1, 1995
7. Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 43, No. 4A, 2004, pp.1496-1500