

키크모터 슬래그 적층량 예측

장제선* · 김병훈* · 조인현*

Prediction for Slag Mass Accumulation in the Kick Motor

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

ABSTRACT

Slag mass deposition was required to predict accurate performance of kick motor (KM) system. Slag mass accumulation was analyzed through the aluminum oxide particle paths to predict slag mass deposition. Numerical analysis to solve both flow field and droplet accumulation was performed with Fluent 6.3 program. The effects for the acceleration and diameters of the aluminum oxide particles was analyzed, finally total slag mass accumulation was acquired. It confirmed that the slag mass deposition was agreed well with previously slag mass prediction based on KM ground test.

초 록

키크모터의 정확한 성능 예측을 위해서 슬래그 적층량을 구하였다. 알루미늄 액적의 궤적 계산을 통해 슬래그가 모터 내부에 적층되는 현상을 나타내었다. 유동현상 및 액적의 적층 현상을 Flunet 6.3을 사용해서 수치해석을 수행하였다. 슬래그 적층량을 예측하기 위해 비행중의 가속도, 액적의 크기 등에 대한 영향을 분석하였고 이를 고려하여 총 슬래그양을 구하였다. 지상시험 결과를 이용해서 구한 슬래그양과 비교해서 수치해석을 통한 슬래그 적층량이 잘 예측된 것을 확인하였다.

Key Words: Slag(슬래그), Alumina(알루미나), Propellant(추진제), Kick Motor(키크모터)

1. 서 론

고체모터에서 추진제가 연소될 때 알루미늄 성분이 Al_2O_3 (산화알루미늄) 액적으로 배출된다. 잠입형 노즐을 사용한 고체모터는 연소되면서 모터 내부 후방돔에 커다란 공동(cavity)을 생성

시킨다. 따라서 액적이 연소가스의 유선을 따라 노즐로 배출되지 못하고 모터 내부의 cavity 영역에 적층된다. 이러한 슬래그는 고체모터 내열 성능 저하의 주요 원인이 되고 후방돔 영역의 내열재를 열분해해서 잔류추력을 발생시킨다 [1],[2],[3]. 이와 같이 슬래그가 적층되면 전체 시스템의 성능에 문제가 발생하므로 정확한 슬래그 양을 파악해야한다. 하지만 KSLV-1의 KM의 경우 슬래그에 대한 고체모터의 비행시험 자료

* 정회원, 한국항공우주연구원
연락처, E-mail: aerototoro@kari.re.kr

가 없다. 또한 고체모터의 슬래그 측정시험으로 알려진 국외의 비행시험 결과도 모터의 크기, 형상, 운행조건이 다르기 때문에 KM에 바로 적용시키기에는 어려움이 있다. 이 연구의 최종 목표는 슬래그가 적층되는 과정을 이해하고 수치해석을 통해 정확한 슬래그양을 예측하는 것이다.

2. 본 론

2.1. 문제 정의 및 해석/경계 조건

연소시간에 따른 추진제 형상의 변화를 고려해서 유동해석에 필요한 모델로 단순화했다. CFD 격자 생성은 Gambit을 사용하였다. 지배방정식으로 정상, 압축성, 2차원 Navier-Stoke's 방정식을 적용하였으며, 공간에 대한 차분은 Roe's FDS(Flux Difference Splitting)을 사용하였다. 난류모델은 SST $\kappa-\omega$ 난류모델을 사용하였다. KM 케이스 형상에서 노즐까지 이어진 해석모델을 축대칭 2차원 형상으로 모델링 하였다. 노즐 팽창비는 35로 비행모델의 설계를 기준으로 했다. 연소시점 51초일 때의 해석영역과 경계조건을 Fig. 1에 나타내었다.

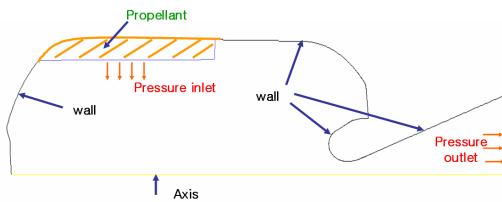


Fig. 1 유동해석 영역 및 경계조건

KM 지상시험 4호기의 온도-압력(Fig. 2)값과 CEA 예측값을 기준치로 정하였다[4]. 지상시험 4호기 충전체는 비행용 규격으로 제작, 시험되었다. 따라서 비행용 KM과 같은 챔버내의 압력과 유량을 보인다고 가정하였다. 연소시점 12초에서 57초까지의 연소가스에 대한 압력, 온도, 비행 중 KM에 작용하는 가속도, 연소가스 열전도율과 점도를 CEA 계산을 이용해서 Table 1에 나타내었다[4].

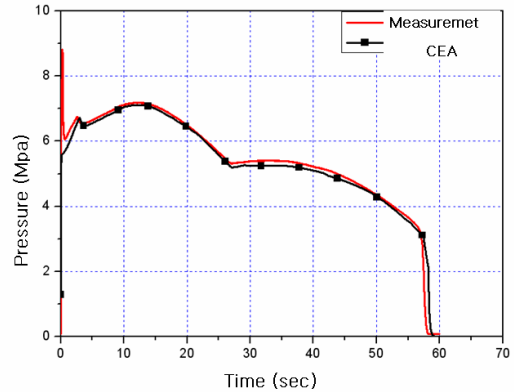


Fig. 2 GT #4 압력 예측값/계측값 비교

Table 1. 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
51	41.818	3420.31	7.5596	2023.0	0.4086	9.899e-5
57	31.701	3394.87	7.0844	2020.9	0.4065	9.848e-5

노즐 확장부와 케이스 후방부에는 정렬 격자를 사용하였고 그 외의 영역에서는 비정렬 격자를 이용했다. 슬래그 해석을 위해서 연소관 후방부, 노즐 상단부 위주로 격자를 집중시켰다. Fig. 3은 해석시점 45초의 격자제이다. 해석영역은 추진제가 연소되면서 변한다.

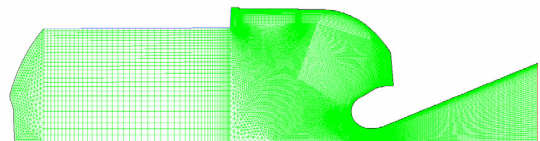


Fig. 3 t=45sec 격자(63333)

2.2 슬래그 적층 해석

2.2.1 알루미늄 액적 크기 및 분포

액적의 크기는 크게 2부분으로 나누어진다[6].

5 μm 이하의 알루미늄 액적이 전체 알루미늄 무게의 70-80%를 차지한다. 그 외의 액적의 직경은 40-200 μm 이고 전체 알루미늄 무게의 20-30%를 차지한다[5],[6]. 추진제 연소에 의한 large size의 알루미늄 액적 사이즈(D_{lg})와 액적 크기 분포를 계산하였다[6]. 연소시점에 따른 액적 크기 누적분포를 Fig. 4에 나타내었다. Table 2는 모터 내부유동 해석을 통한 연소가스, Al_2O_3 와 large size droplet 질유량이다[4].

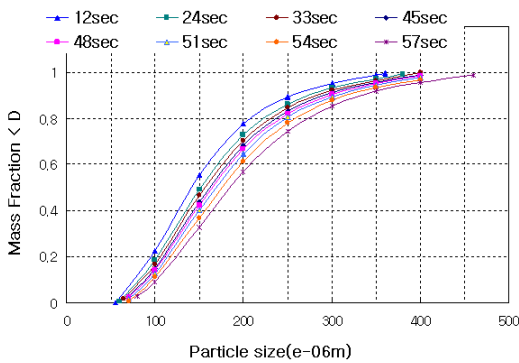


Fig. 4 Large size 알루미늄 액적 크기 분포

table 2 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
51	18.1026	5.4663	1.3666
57	13.7583	4.1464	1.0366

2.2.2 슬래그 적층 해석/경계 조건

알루미늄 액적 적층 해석을 위해 Fluent의 Discrete Phase Models를 사용하였다. 액적 입자들은 추진제 표면을 출발해서 액적의 크기와 위치에 따라 이동 궤적이 변화한다. 슬래그 해석을 위해서 Fig. 5와 같이 적층되는 표면을 후방 돔과 노즐입구 적층영역을 정의해서 이 영역에 부딪치는 액적의 적층량을 구하였다.

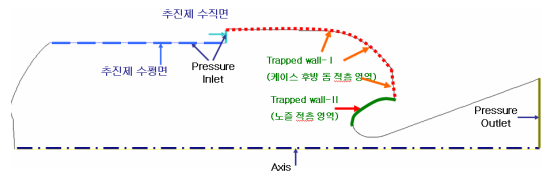


Fig. 5 슬래그 적층 해석/경계 조건

2.2.3 액적 크기와 가속도에 따른 슬래그 적층 영향 Al_2O_3 액적 크기에 따른 효과를 알아보았다. 직경이 10 μm 의 액적은 대부분 적층되지 않고 연소가스 유선을 따라 후방 돔에서 방향전환을 하면서 노즐로 빠져 나왔다.(Fig. 6) 액적 직경이 200 μm 일 때는 연소가스와 같이 방향전환을 하지 못하고 케이스 내부에 적층된다.(Fig. 7)

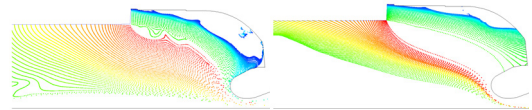


Fig. 6 직경 d=10 μm 액적(45sec)

Fig. 7 직경 d=200 μm 액적(45sec)

축방향 가속도 유무에 따른 슬래그 적층량을 비교하였다. 액적의 크기가 커짐에 따라 액적에 작용하는 가속도 영향이 커진다. 가속도가 존재할 때는 액적이 체적력을 받아서 연소가스 유선에서 벗어나 후방돔에 적층된다.(Fig. 8~9)

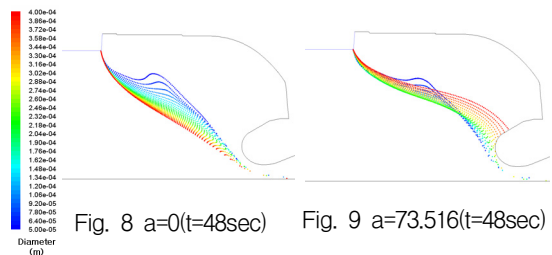


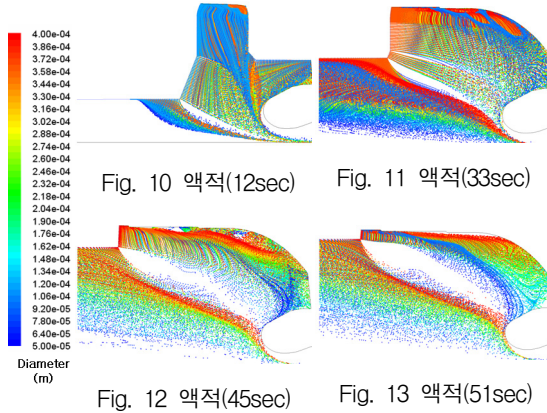
Fig. 8 a=0(t=48sec)

Fig. 9 a=73.516(t=48sec)

2.2.4 전체 슬래그 적층량

총 슬래그양을 구하기 위해서 각 연소시점 (12-57초)의 적층량을 구하였다. 연소시점 12~33초에서 추진제 표면 수평부분에서는 액적 대부분이 노즐을 통해서 빠져나간다.(Fig. 10~11) 이때는 노즐목 직경과 액적 시작지점의 반경의 차이가 크지 않고 압력 구배가 높기 때문에 액적

이 연소가스의 궤적을 이탈하지 않는다. 연소 중반 이후로는 큰 액적은 후방돔 영역과 노즐 입구면에 적층되고 직경이 작은 액적은 연소가스 유선을 따라 노즐로 빠져나간다.(Fig. 12~13)



모터 내부에 적층되는 액적의 질량을 구한 결과 연소시점에 따라 Fig. 14의 분포를 이루었다. 총 연소시간 동안 슬래그 적층량을 적분하였고 약 8.1kg으로 예측되었다. Star 48의 지상 및 비행 시험 결과와 SRMU 등의 형상을 고려한 결과 분석을 통해 KM의 비행시 예측한 슬래그량은 6.8kg이었다[5]. 이 슬래그량은 수치해석을 통해 예측된 8.1kg값과 유사하다. 하지만 연소 중반 약 33초 이전의 적층된 액적은 유동장과 액적의 영향으로 튕겨 나와서 실제로는 계산된 적층량보다 감소될 것으로 예상된다.

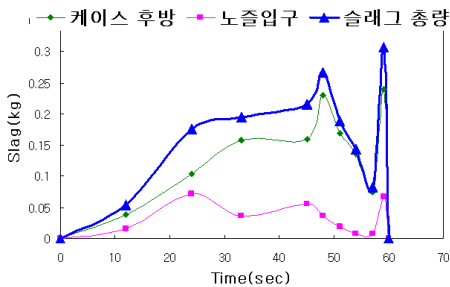


Fig. 14 슬래그 적층량

3. 결 론

비행 중 KM 내부 슬래그 적층해석을 수행하

였다. 추진체의 남은 표면에서 발생하는 액적의 궤적을 모사하였다. 케이스 후방돔과 노즐 입구면에 부딪치는 액적이 적층된다는 경계조건을 이용해서 슬래그 적층량을 구하였다. 연소가 종료되기 까지 총 슬래그량은 약 8.1kg으로 예측되었다. 하지만 연소 중반 약 33초 이전의 적층된 액적은 유동장과 액적의 영향으로 튕겨 나와서 실제로는 계산된 적층량보다 감소될 것으로 예상된다. 따라서 해석을 통한 슬래그 양은 Star 48의 지상 및 비행 시험 결과를 토대로 KM의 비행시 슬래그 퇴적양을 예측한 결과인 6.8kg과 잘 맞는 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 소형위성발사체(KSLV-1) 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

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