

## 킵모터 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

Accumulated slag mass was predicted to estimate accurate performance of kick motor (KM) system. The validation of numerical analysis was performed with mass flow rate measured at the 4th ground test of the KM. The study described here includes the internal flow field of KM at various time steps during burning. 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. Analysing the effects of the acceleration, starting position and diameters of the aluminum oxide particles, total slag mass accumulation was obtained.

### 초 록

킵모터의 정확한 성능 예측을 위해서 슬래그 적층량을 구하였다. 수치해석의 타당성을 확인하기 위해 KM 4호기의 질유량 시험값을 비교하였다. 비행 중 KM 슬래그 적층해석을 위해 각 시점별 내부유동 현상을 분석하였다. 알루미나 액적의 궤적을 통해 슬래그가 모터 내부에 적층되는 현상을 나타내었다. Fluent 6.3을 사용해서 유동현상 및 액적의 적층현상에 대한 수치해석을 수행하였다. 슬래그 적층량을 예측하기 위해 비행중의 가속도, 액적 출발점 위치, 액적의 크기 등에 대한 영향을 분석하였고 이를 고려하여 총 슬래그 양을 예측하였다.

Key Words: Slag(슬래그), Alumina(알루미나), Propellant(추진제), Kick Motor(킵모터), Combustion Gas(연소가스)

### 1. 서 론

고체로켓모터에서 추진제가 연소될 때 알루미나 성분은  $Al_2O_3$ (산화알루미나 또는 알루미나)

액적으로 배출된다. 잠입형 노즐을 사용한 고체로켓모터는 연소되면서 모터 내부 후방돔에 커다란 공동(cavity)을 생성시킨다. 이로 인해 액적이 연소가스의 유선을 따라 노즐로 배출되지 못하고 모터 내부에 적층된다. 이러한 슬래그는 모터 내열성능 저하의 주요 원인이 되고 후방돔 영역의 내열재를 열분해해서 잔류추력을 발생시

† 2008년 9월 2일 접수 ~ 2009년 6월 29일 심사완료

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

킨다[1-3]. 그러므로 슬래그가 적층되면 전체 시스템의 성능에 문제가 발생하므로 정확한 슬래그 양을 파악해야한다. 하지만 KSLV-I의 KM의 경우 슬래그에 대한 고체모터의 비행시험 자료가 없다. 고체모터의 슬래그 측정시험으로 알려진 국외의 비행시험 결과 또한 모터의 크기, 형상, 운행조건이 다르기 때문에 KM에 바로 적용시키기에는 어려움이 있다. 이 연구의 최종 목표는 슬래그가 적층되는 과정을 이해하고 수치해석을 통해 정확한 슬래그 양을 예측하는 것이다.

## 2. 본 론

### 2.1 KM 지상시험 유동해석

#### 2.1.1 문제 정의 및 해석/경계 조건

유동해석 모델은 연소시간에 따른 추진체 형상의 변화를 고려해서 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  $k-\omega$  난류모델을 사용하였다.

노즐 출구 뒤쪽에서 외부 유동영역까지 모델링하였다. 노즐 출구를 압력 경계조건으로 설정했을 때 계산이 발산하는 경우가 많았고 충격파에 의한 압력유지가 힘들었다. 따라서 외부영역까지 확장시켜 계산하였다. 축대칭 형상이므로 2차원 단면으로 모델링 하였다. 연소시작 후 54초 일 때의 KM 해석영역과 경계조건은 Fig. 1에 나타내었다.

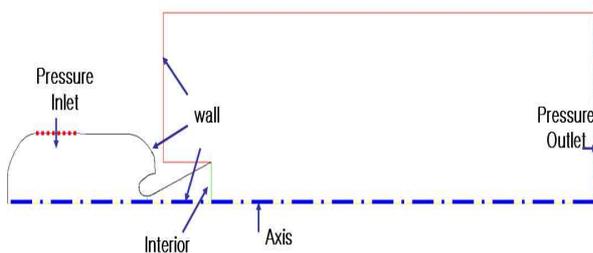


Fig. 1 Computer modeling for KM ground test

### 2.1.2 KM 지상시험 해석 결과 및 검증

해석에 대한 검증을 위해 KM 3호기까지의 지상시험을 통한 CEA값을 보정한 결과를 이용해 내탄도 해석을 수행하였다. 해석결과 Fig. 2~3과 같이 압력, 추력 값이 시험 값과 일치함을 알 수 있었고 따라서 내탄도 분석을 통한 질유량 값을 기준값으로 정하였다[4]. 지상시험 4호기 충전체는 비행용 규격으로 제작, 시험되었다. 따라서 비행용 KM과 같은 챔버내의 압력과 유량을 보인다고 가정하였다. 연소가스의 물성치를 평형상태로 가정하고 노즐목 삭마 조건을 고려한 유동해석을 수행하고 질유량을 비교하였다. Table 1과 같이 노즐목 삭마와 평형상태라고 가정했을 때의 질유량이 6% 차이로 시험값과 유사한 결과를 보임을 확인할 수 있었다.

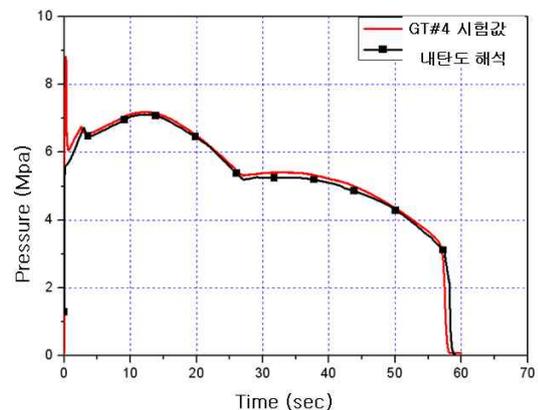


Fig. 2 Pressure comparison of prediction with test result for GT #4

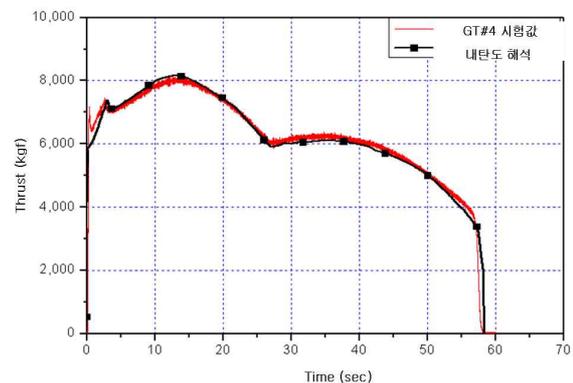


Fig. 3 Thrust comparison of prediction with test result for GT #4

Table 1. Comparison of mass flow rate

Time (sec)	Pressure (bar)	Case	Mass flow rate (kg/sec)
54	37.049	Equilibrium	15.10(-23.04%)
		노즐목 삭마	17.78(-9.39%)
		노즐목 삭마 + Equilibrium	<b>18.28(-6.83%)</b>
		Ref. (내탄도 해석[4])	19.62

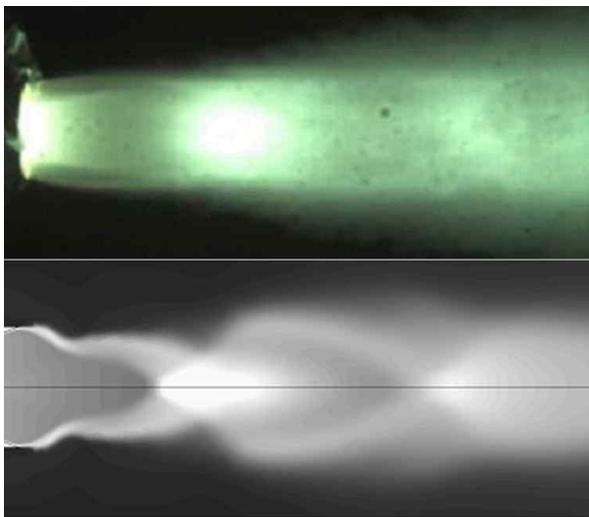


Fig. 4 Temperature contour of combustion test and analysis for GT #4

또한 연소 후반부의 노즐목 삭마로 인한 질유량 값 증가 비율은 약 1.21이었다.

Figure 4의 12초대의 온도선도와 지상 연소시험 사진을 비교해 보았을 때 노즐 후단 화염 형태가 계산 결과가 유사한 것을 알 수 있다.

## 2.2 KM 비행모델 유동해석

### 2.2.1 문제 정의 및 해석/경계 조건

비행용 KM 유동해석 조건은 지상용 해석모델과 동일한 지배 방정식, 난류모델을 사용하였다. 연소가스의 물성치는 평형상태라고 가정하였다. 노즐목 삭마는 슬래그 적층 패턴에 큰 영향을 주지 않으므로 고려하지 않았다. KM 케이스 형상에서 노즐까지 이어진 해석모델을 축대칭 2차원 형상으로 모델링하였다. 노즐 팽창 비는 35로

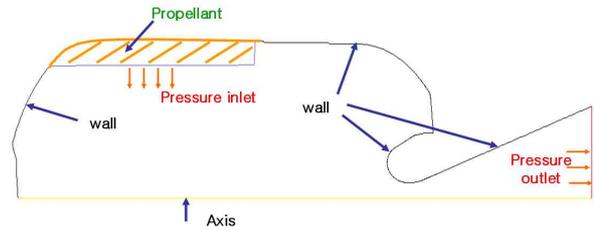


Fig. 5 Schematic of analysis and boundary condition

Table 2. Materials of combustion gas

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	3641.7	1.1351	9.993e-5
33	52.523	3440.74	5.8690	3797.4	1202.4	9.940e-5
45	47.753	3432.26	7.2632	3849.2	1.2245	9.923e-5
48	45.281	3427.49	7.5016	3878.6	1.2371	9.913e-5
51	41.818	3420.31	7.5596	3923.6	1.2561	9.899e-5
54	37.049	3409.27	7.5127	3993.9	1.2853	9.877e-5
57	31.701	3394.87	7.0844	4087.8	1.3247	9.848e-5

비행모델의 설계를 기준으로 했다. 슬래그 적층 해석에서는 노즐 바깥영역은 고려하지 않았다. 연소시점 51초일 때의 해석영역과 경계조건을 Fig. 5에 나타내었다. 연소시점 12초에서 57초까지의 연소가스에 대한 압력, 온도, 비행 중 KM에 작용하는 가속도, 연소가스의 열전도율과 점도를 Table 2에 나타내었다. 물성치 및 해석 조건은 CEA 계산을 이용하여 구하였다[4].

### 2.2.2 격자계

노즐 확장부와 케이스 후방부에는 정렬 격자를 사용하였고 그 외의 영역에서는 비정렬 격자를 이용했다. 슬래그 적층해석을 위해서 연소관 후방부, 노즐 상단부 위주로 격자를 집중시켰다. 또한 속도변화가 큰 노즐 목과 노즐 벽면에 격자를 집중시켰다. Fig. 6은 각 해석시점의 격자계이다. 연소시점 12초부터 57초까지 해석영역은 추진제가 연소되면서 변한다.

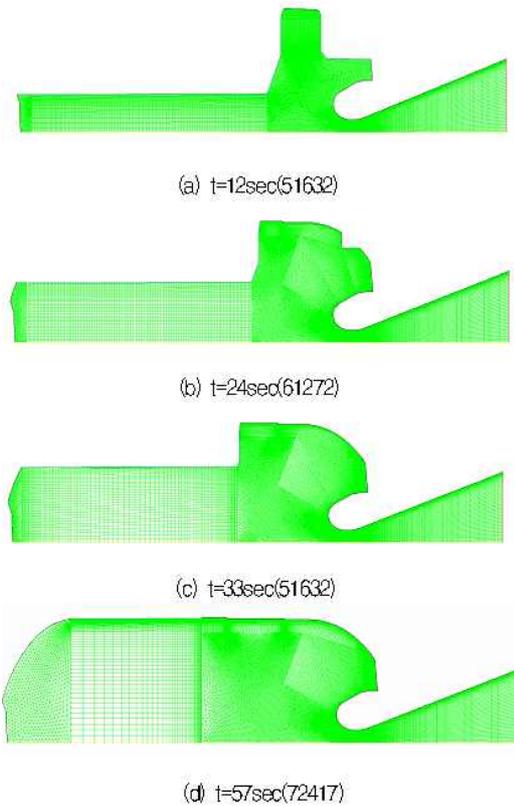


Fig. 6 Mesh

2.2.3 KM 비행모델 유동 해석 결과 및 검증  
 압축성 정상유동으로 내부 유동장을 수립시켰다. 유동장 변수의 residual이 1e-3이하가 나올 때까지 반복계산(iteration)하였다(Fig. 7). 지상시험 해석에서 노즐목 삭마로 인한 질유량 증가 비율인 1.21을 고려하면 질유량은 연소 후반부에서 시험값과 1%이내로 일치함을 알 수 있다(Fig. 8, Table 3).

연소가스 path-line은 추진제 표면을 출발점으로 연소가스가 지나가는 경로를 나타낸다. 33초 이후에서는 후방돔에 남아있는 추진제가 모두 연소되고 dead-zone이 생성되기 시작한다. 연소 후반부로 갈수록 압력이 크게 떨어지면서 dead-zone영역이 확장된다. 내부 유동패턴은 압력과 남은 추진제의 형상에 따라 변화한다(Fig. 9~10).

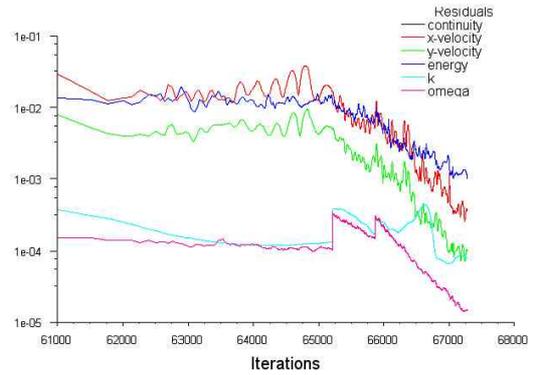


Fig. 7 Residuals

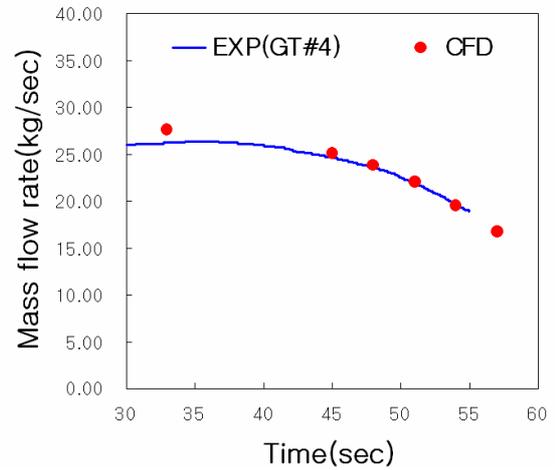


Fig. 8 Mass flow rate of CFD and test result

Table 3. Mass flow rate

Time (sec)	$\dot{m}_{exp}$ (kg/sec)	$\dot{m}_{CFD}$ (kg/sec)	$\frac{\dot{m}_{CFD}}{\dot{m}_{exp}} \times 100$ (%)
33	26.164	27.6026	5.498
45	24.5962	25.113	2.101
48	23.5322	23.8219	1.231
51	21.1971	22.0161	0.360
54	19.6211	19.5303	-0.463
57	16.941	16.7323	-1.231

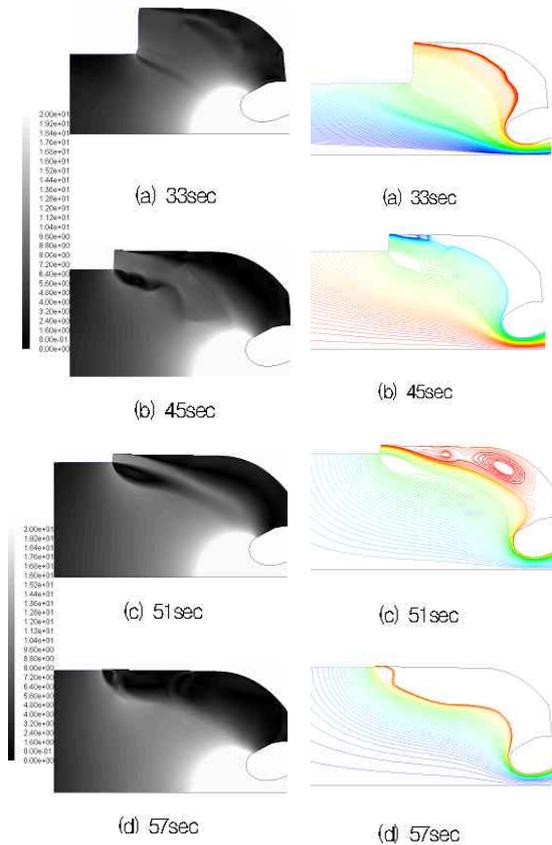


Fig. 9 Contours of velocity

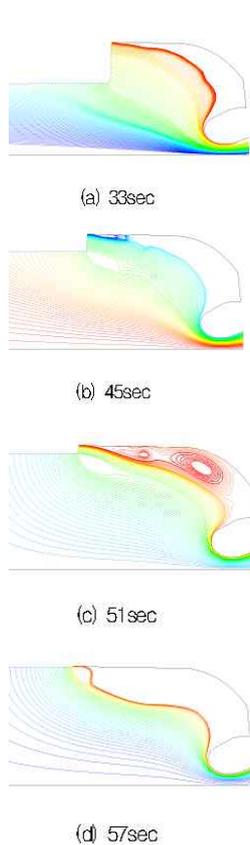


Fig. 10 Contours of pathline

2.3 슬래그 적층 해석

2.3.1 알루미늄 액적 크기 및 분포

적층되는 슬래그 양을 계산하기 위해서 먼저 각 연소시점에서의 액적의 크기분포와 발생량을 알아야 한다. AP계열의 추진제의 경우 large size의 액적 사이즈(aluminum agglomerate =  $D_{ag}$ )는 식(1)을 이용하여 구한다[6]. 액적 크기는 액적이 연소실에서 노즐방향으로 이동할 때 증발하여 실제 크기보다 감소한다. 감소비율은 연소압력에 따라 변하는데 실험 및 분석적 결과에 의하면 0.6에서 0.8 범위로 알려져 있다[6]. 키크모터의 경우는 Shuttle Booster가 500psi일 때 감소비율인 0.74로 가정하였다[6]. 식(1)을 이용하여 연소시점에서 large size 액적의 평균직경( $D_m$ )을 구하였고 Table 4에 나타내었다. 식(2)를 이용하여 large size 액적 크기분포를 계산하였고 누적

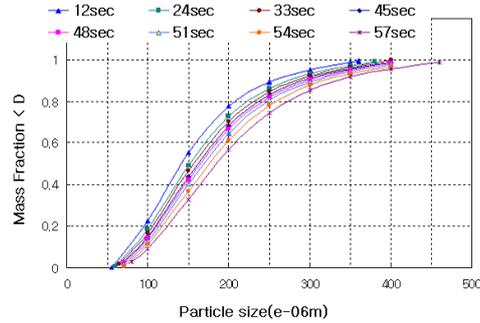


Fig. 11 Particle diameter distribution

분포를 Fig. 11에 나타내었다.

시험에 의하면 연소에 의한 알루미나 액적의 크기 분포는 크게 2부분으로 나누어진다[6]. 직경  $5\mu\text{m}$  이하의 알루미나 액적이 전체 알루미나 무게의 70~80%를 차지한다. 그 외의 액적의 직경은 40~200 $\mu\text{m}$ 이고 크기분포는 추진제 성분 및 연소압력에 따라 달라지며 전체 알루미나 무게의 20~30%를 차지한다고 알려져 있다[5, 6]. 따라서 키크모터의 경우는  $5\mu\text{m}$ 이하의 액적의 무게가 75%, large size 액적이 25%라고 가정하였다. Table 5는 키크모터 내부유동 해석과 CEA 결과를 이용해 연소가스,  $Al_2O_3$ , large size droplet의 질유량을 구하였다[4].

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

$f_s$  = solid fraction in the propellant(Al + AP)

$r$  = burn rate (inch/sec)

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

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

$\text{erf}$  = error function

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

$\sigma = 0.2$  (표준편차),  $D_m$  = 액적 평균직경 크기

2.3.2 슬래그 적층 해석/경계 조건 및 검증

알루미나 액적의 적층해석을 위해 Fluent의 Discrete Phase Models를 사용하였다. 각 연소시

Table 4. Average droplet size of alumina

연소시점 (sec)	KM 내부 압력 (bar)	연소속도 (mm/sec)	알루미나액적 사이즈 $D_m(\mu$ m)
12	71.122	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

Table 5. Mass flow rate of alumina

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

점에서 액적의 궤적을 통해 적층량을 구하였다. 액적 입자들은 추진제 표면을 출발해서 크기와 위치에 따라 이동궤적이 변화한다. 일반적으로 액적의 크기가 작을수록 연소가스의 유선을 따라 노즐로 잘 빠져나간다. 액적의 크기가 커지면 연소가스의 유선을 따라가지 못하고 모터 내부 표면에 적층된다. 슬래그 해석을 위해서 Fig. 12와 같이 케이스 후방 돔 적층영역(trapped wall-I)과 노즐입구 적층영역 (trapped wall-II)을 정의해서 이 영역에 부딪치는 액적의 적층량을 구하였다. 슬래그 해석의 예비 검증으로 액적 크기에 따라 슬래그의 적층 유무를 알아보았다. 직경이  $10\mu\text{m}$ 와  $200\mu\text{m}$ 인 액적의 궤적을 비교하였다.

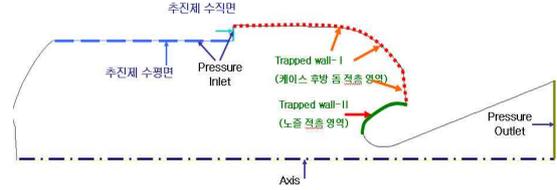


Fig. 12 Schematic of analysis and boundary condition for slag accumulation

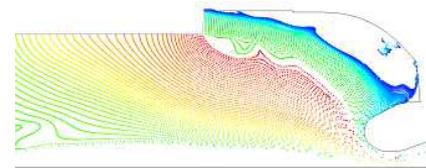
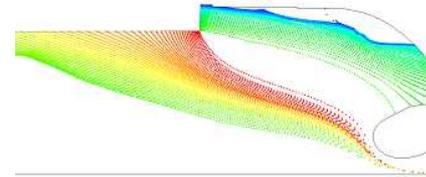
(a)  $D=10\mu\text{m}$  (45sec)(b)  $D=200\mu\text{m}$  (45sec)

Fig. 13 Effect of size on slag particle trajectory

직경이  $10\mu\text{m}$ 의 액적은 대부분 적층되지 않고 연소가스 유선을 따라 후방 돔에서 방향전환을 하면서 노즐로 빠져 나왔다(Fig. 13(a)). 액적 직경이  $200\mu\text{m}$ 일 때는 연소가스와 같이 방향전환을 하지 못하고 케이스 내부에 적층된다(Fig. 13(b)).

### 2.3.3 액적 위치에 따른 슬래그 적층 영향

Figure 14는 연소시점 51초일 때 액적의 초기 위치에 따른 액적의 궤적이다. 알루미나 액적이 나오는 위치에 따라 액적의 이동경로가 달라지며 같은 지점에서도 액적의 직경에 따라 이동경로와 적층되는 위치가 달라진다. 추진제 수직면에서 발생하는 액적은 직경 크기가 클수록 후방 돔 영역에 적층되고 작을수록 노즐로 빠져나가거나 노즐 입구면에 적층된다. 추진제 수평면에서 나오는 액적의 대부분은 노즐을 통해 밖으로 나간다.

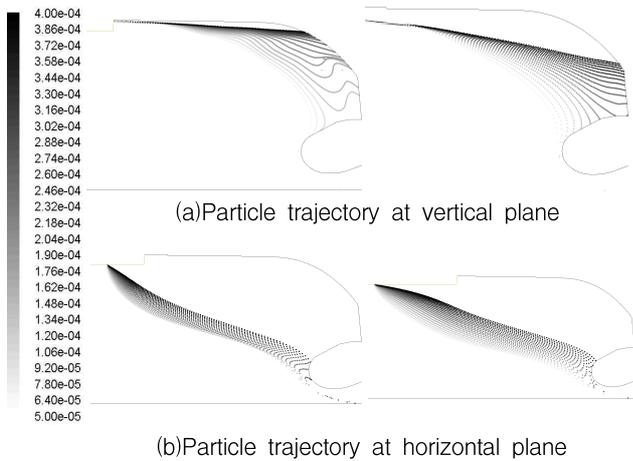


Fig. 14 Slag particle trajectory along the positions

2.3.4 가속도 영향에 따른 슬래그 적층량

Figure 15에서 축방향 가속도 유무에 따른 슬래그 적층량을 비교하였다. 액적의 크기가 커짐에 따라 액적에 작용하는 가속도 영향이 커져서 연소가스의 유선을 따라 가지 못하고 케이스에 적층된다. 비행중 가속도가 존재할 때는 알루미늄 액적이 체적력을 크게 받아서 연소가스 유선에서 벗어나고 후방돔에 대부분 적층된다.

2.3.5 전체 슬래그 적층량

총 슬래그 적층량을 구하기 위해서 각 연소시점(12-57초)의 슬래그 적층량을 구하였다. 알루미늄 액적은 Fig. 11의 large size 액적 크기 분포

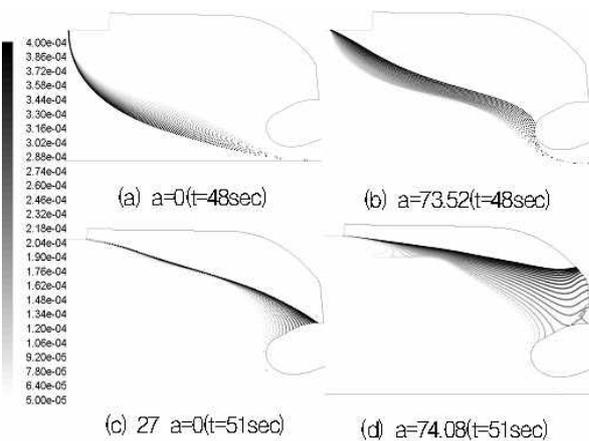


Fig. 15 Effect of acceleration on slag particle trajectory

를 가지며 Table 5의 large droplet  $Al_2O_3$  질유량이 연소 중 그 시간대의 추진제 표면에서 공급된다고 가정하였다.

Figure 16(a)~(b)와 같이 연소시점 12~24초에서 추진제 표면 수평부분에서는 알루미늄 액적 대부분이 노즐을 통해서 빠져나간다. 이때는 노즐목 직경과 알루미늄 액적 시작지점의 반경의 차이가 크지 않고 압력 구배가 높기 때문에 액적이 연소가스의 궤적을 이탈하지 않는다. 연소중반 이후로는 Fig. 16(c)~(h)와 같이 큰 액적은 후방돔 영역과 노즐 입구면에 적층되고 직경이 작은 액적은 연소가스 유선을 따라 노즐로 빠져나간다. 노즐로 빠져나가지 못하고 적층되는  $Al_2O_3$ 의 질량을 구한 결과 Fig. 17의 분포를 이루었다. 총 연소시간 동안 슬래그 적층량을 적분하여 총량을 구하였다. 슬래그의 총량은 약 8.12 kg이며 후반 50초일 때 적층량이 가장 많았다.

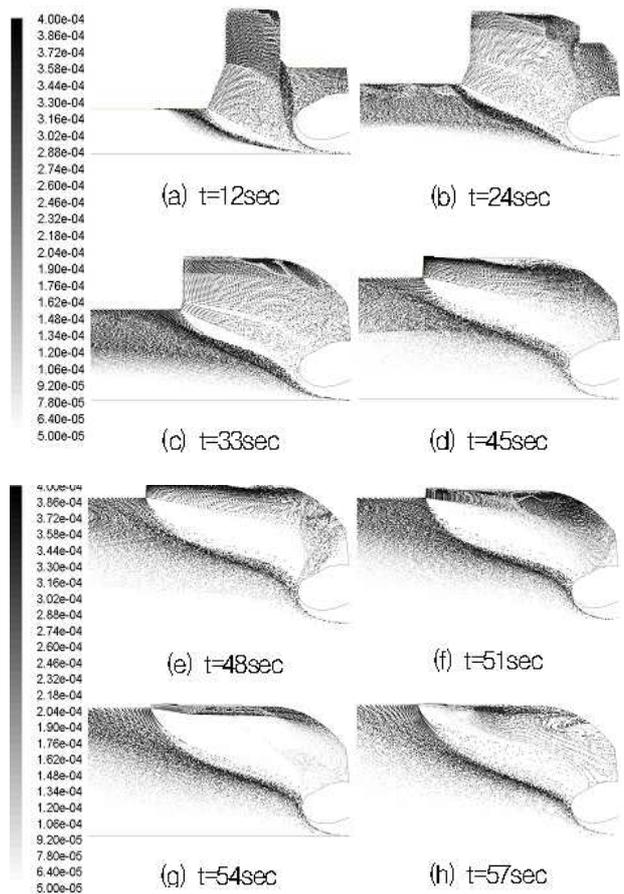


Fig. 16 Slag particle deposition

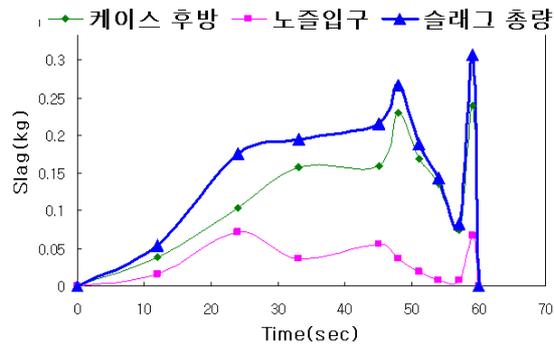


Fig. 17 Total slag flow rate

슬래그 적층이 시작하는 시점을 정확하게 예측하긴 어렵다. 연소초기(12초~24초)에는 연소되는 추진제에서 발생하는 cross flow로 인해 큰 액적을 제외하고 노즐 밖으로 흘러나가는 반면 연소 후반기에는 후방돔 부근에 재순환영역이 발생하고 cross flow가 슬래그 적층되는 것을 더 이상 방해하지 않게 되므로 후방돔의 cavity영역에 액적들이 적층된다[1]. PAM-D 고체로켓모터에서 슬래그 적층은 비행 중의 마지막 20초에서 30초 사이에 일어난다고 시험에 의해 밝혀졌다[7]. 키크모터의 경우에도 33초 이전에는 후방돔에 추진제가 남아있기 때문에 cross flow가 슬래그가 적층되는 것을 방해하게 된다. 따라서 실제 슬래그 적층량은 해석을 통한 예측량보다 감소될 것으로 예상된다.

### 3. 결 론

키크모터의 슬래그 적층량을 수치해석 방법으로 구하였다. 슬래그 적층량을 예측하는 데는 알루미늄 액적의 발생 위치, 액적 크기, 키크모터에 작용하는 가속도가 중요한 인자로 작용하였다. 연소가 종료되기까지 키크모터 내부에 적층되는 슬래그량은 약 8.12 kg으로 예측되었다. 그러나 cross flow가 존재하는 연소초기(12~24초)에는

슬래그가 적층되지 않는다고 알려져 있다[7]. 따라서 실제 슬래그 적층량은 해석을 통한 예측량보다 감소될 것으로 예상된다.

### 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, 1984, pp.47-54
2. Randall Smith-Kent and Fred Perkins, "A Potential, Two - Phase Flow Model For Predicting Solid Rocket Motor Slag," *AIAA 93-2307*, 1993, pp.1-15
3. S. Boraas, "Modeling Slag Deposition in the Space Shuttle Solid Rocket Motors," *AIAA 82-1061*, 1982, pp.1-15
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, pp.10-23
7. V.E. Haloulakos, "Slag Mass Accumulation in Spinning Solid Rock Motors", *Journal of Propulsion and Power*, Vol.7, No.1, 1991, pp.14-21