

키크모터 무게 변화 예측

길경섭* · 고현석* · 김병훈* · 조인현*

Prediction of Kick Motor Mass Variation

Gyoung-Sub Kil* · Hyeon-Seok Kho* · Byung-Hun Kim* · In-Hyun Cho*

ABSTRACT

Kick motor(KM) for KSLV-I second stage propulsion system is the main hardware that is necessary for launching satellite to it's track. The mass of the kick motor changes with combustion time because the heat insulator is ablated and propellant is used and slag is piled up. We predicted mass change with the flight time using ground combustion data of KM composed of case, propellant, nozzle, ignitor and slag. The mass prediction of kick motor can be used for calculating the two stage mass and center of gravity history.

초 록

KSLV-I 2단 추진기관에 적용될 키크모터는 고고도용 고체 추진기관으로 인공위성을 궤도에 진입시킬 때 반드시 필요한 하드웨어이다. 키크모터는 연소 시 내부에 내열체가 삭마되고 추진제가 소진되며 반면에 슬래그 적층으로 인해 무게가 변하게 된다. 본 문서는 지상연소시험 시 케이스, 추진제, 노즐, 점화기, 슬래그 등으로 구성된 키크모터의 무게 변화량을 분석하여 실제 비행시간에 따른 무게 변화량을 예측하였다. 키크모터의 비행 시 무게 변화 예측은 KSLV-I 2단의 무게 및 무게중심 변화를 계산하는데 활용될 수 있다.

Key Words: Launch Vehicle(발사체), Kick Motor(키크모터), Propellant(추진제), Case(연소관), Nozzle(노즐), Ignitor(점화기), Flight Model(비행용 모델)

1. 서 론

키크모터(kick motor)는 KSLV-I 2단에 적용 예정으로 고고도에서 작동할 수 있도록 설계되었다. 또한 시스템 요구사항을 충족시키기 위해서 우선 고체 추진기관 시스템에서 요구되는 제원

에 대한 예비설계 최적화를 위한 연구를 수행하고 각종 인증시험을 통해 개발되었다.

본 논문은 키크모터의 무게 변화의 요인이 되는 케이스, 추진제, 노즐, 점화기, 슬래그 등의 비행시간에 따른 무게 변화량을 지상연소시험 및 해외 모터의 시험자료를 통해 예측하였다.

* 한국항공우주연구원 추진제어팀
연락처, E-mail: kgs@kari.re.kr

2. 본 론

키크모터 비행 시 무게 변화 요인은 크게 주요 구성품인 점화기, 케이스, 노즐의 삭마와 추진제의 소진 그리고 슬래그의 적층으로 나눌 수 있다. 구성품의 삭마량은 지상연소시험 데이터를 이용하여 경험식을 만들었고, 추진제는 내탄도 예측 값을 사용하였다. 또한 키크모터의 비행 시 슬래그 양을 계산하기 위하여 지상연소시험 시 슬래그 양과 Star 48과 SICBM의 지상연소시험과 비행 데이터의 상호관계를 참조하였다.[1, 2]

2.1 점화기 무게 변화 예측

점화기는 파이로젠 타입으로 연소가 시작하면 최초로 점화기 추진제가 0.3초 이내에 모두 사라지고 키크모터의 주 추진제가 연소함에 따라 점화기 내열재가 삭마되는 것을 고려하여 비행 시 점화기 무게 변화 예측을 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- 점화기 연소 초기(0.3sec 이내)에 내부 추진제 (약 0.630kg)가 완전 소진된다.
- 연소시간(57.7sec) 동안 일어나는 내열재 감소는 0.152kg으로 선형적으로 일어난다.
- 비행시험 시 점화구동부의 중량 변화는 지상연소시험과 같다.

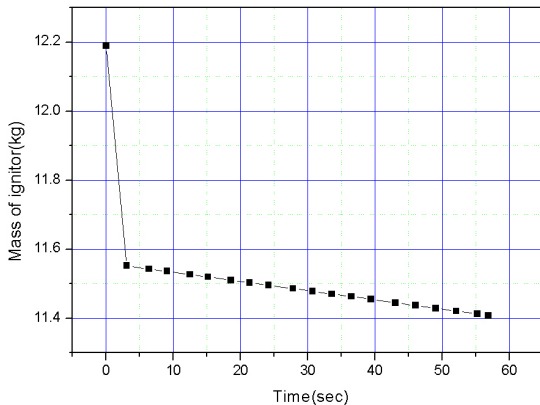


Fig. 1. Ignitor mass history

이와 같은 가정에 기초하여 비행모델의 중량 변화를 예측한 결과는 Fig. 1과 아래 식으로 표현될 수 있다.

→ 1단계(0 ~ 0.3sec) :

$$\text{추진제 소모량(kg)} = 0.630 \times (t/0.3)$$

→ 2단계(0.3 ~ 57.7sec) :

$$\text{내열재 삭마량(kg)} = 0.152 \times (t/57.7)$$

※ t : 시간(sec)

2.2 케이스 무게 변화 예측

케이스의 무게 변화는 주요 구성품인 내열재, 복합재, 금속부품 중에 내열재가 연소가스에 의해 삭마된다. 내열재는 연소가스에 노출되어야 삭마되는데 그 시점은 내열재의 각 위치별로 다르다. 따라서 비행 시 케이스 무게 변화 예측을 위해 아래와 같은 가정을 하였다.

- 내열재는 연소가스에 노출되는 시점부터 삭마된다.
- 내열재의 삭마량은 내부 유동(온도, 압력, 유속 등)에 영향을 받지 않고 57.7sec 동안 6.4kg 삭마된다.
- 비행시험 시 케이스의 중량 변화는 지상연소시험과 같다.

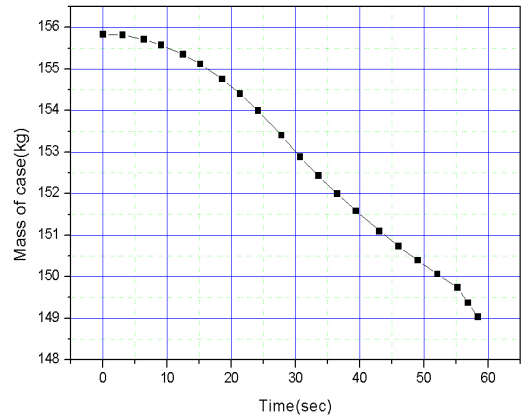


Fig. 2. Case mass history

이와 같은 가정에 기초하여 비행모델의 중량 변화를 예측한 결과는 Fig. 2와 다음 식으로 표현될 수 있다.

→ 1단계(연소가스에 노출 전) :

$$\text{내열재 두께(mm)} = T_{\text{initial}} = 5$$

→ 2단계(연소가스에 노출 후) :

$$\text{내열재 두께(mm)} = T_{\text{initial}} - 0.066 \times t$$

※ t : 시간(sec), T_{initial} : 초기 두께(mm)

2.3 노즐 무게 변화 예측

노즐은 전방부 수렴부 내열재, 노즐 목, 노즐 확장부 내열재등의 삭마가 발생한다. 따라서 비행 시 노즐 무게 변화 예측을 위해 아래와 같은 가정을 하였다.

- 노즐은 전방부 내열재, 노즐목, 확장부 내열재가 삭마된다.
- 키크모터의 연소시간(57.7sec) 동안 일어나는 내열재 감소는 4.2kg으로 선형적으로 감소된다.
- 비행시험 시 노즐의 중량 변화는 지상연소시험과 같다.

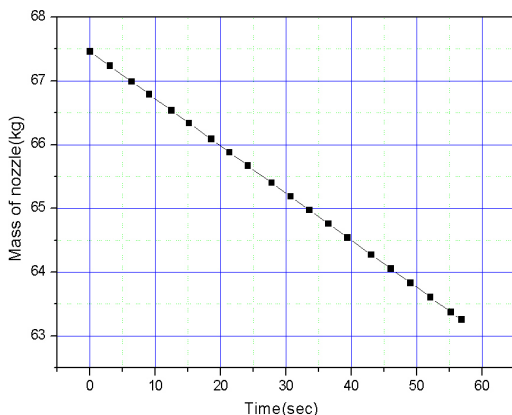


Fig. 3. Nozzle mass history

이와 같은 가정에 기초하여 비행모델의 중량 변화를 예측한 결과는 Fig. 3과 다음 식과 같이 표현 될 수 있다.

$$\text{노즐 내열재 삭마량(kg)} = 4.2 \times (t/57.7)$$

※ t : 시간(sec)

2.4 추진제 무게 변화 예측

키크모터에 적용된 고체 추진제는 연소 시 고압의 가스로 변화하여 추력을 발생시키는 역할을 하며 연소 말기에는 모두 소진되게 된다.

비행 시 추진제 무게 변화는 내탄도 해석을 통해 예측하였다. Fig. 4는 비행모델의 시간에 따른 중량 변화를 예측한 결과이며, 추진제는 표면에 수직한 방향으로 연소되어 연소말기(57.7sec)에는 추진제가 모두(1578.87kg) 소진된다.

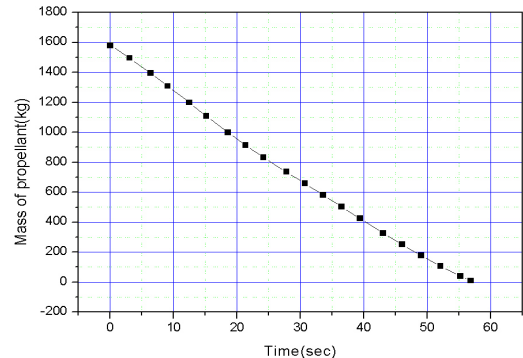


Fig. 4. Propellant mass history

2.5 슬래그 적층 무게 예측

고체 모터 추진제에 포함된 알루미늄은 비추력을 증가시키고 고체모터의 연소 불안정성을 감소시키는 역할을 하지만 연소 중 슬래그를 생성시켜 불필요한 무게 증가를 발생시킨다. 따라서 비행 시 슬래그 무게 변화 예측을 위해 아래와 같은 가정을 하였다.

- 비행 시 슬래그의 적층은 가속도의 영향으로 케이스 후방부와 노즐사이에만 적층된다.
- 슬래그는 연소 시간의 약 1/4되는 시점부터 퇴적하기 시작한다.
- 슬래그는 초기 15초까지는 적층되지 않으며, 연소 중 가속도로 인해 6.8kg까지 선형적으로 적층된다.

이와 같은 가정에 기초하여 비행모델의 중량 변화를 예측한 결과는 Fig. 5와 다음 식과 같이 표현 될 수 있다.

→ 1단계(0 ~ 15sec) :

$$\text{슬래그 퇴적 무게(kg)} = 0$$

→ 2단계(15 ~ 57.7sec) :

$$\text{슬래그 퇴적 무게(kg)} = 0.157 \times t - 2.350$$

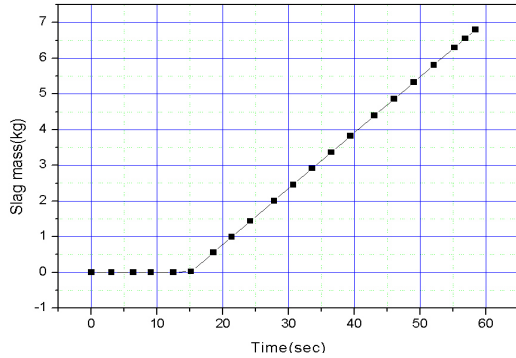


Fig. 5. Slag mass history

Figure 6과 같이 연소 후 15초 이후부터 적층이 되며, 연소관 후방 잠입부의 약 18%정도까지 슬래그가 퇴적 된다.

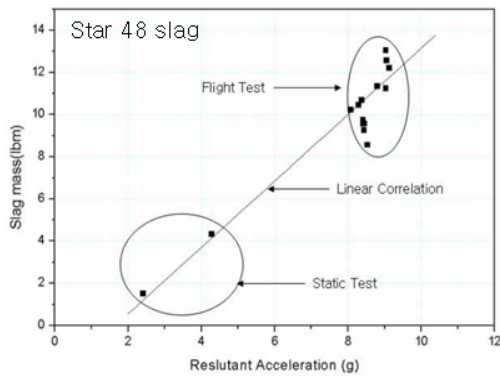


Fig. 6. Slag mass for Star 48 [2]

키모터의 비행 시 슬래그 양을 계산하기 위하여 Star 48(Fig. 10 참조)과 SICBM의 지상연소시험과 비행 데이터[1]의 상호관계를 분석한 결과, 지상연소시험 슬래그 양(0.51kg)의 약 13배 (6.8kg)가 키모터의 비행 시 적층될 것으로 예측된다.

2.6 무게 변화 예측 결과

키모터의 비행 중 무게 변화는 Table 1과 같다. 점화기, 노즐, 케이스, 추진제, 슬래그 등의

비행시간에 따른 무게 변화량은 앞서 설명된 방법으로 유추하였으며, 각 구성품의 무게 합이 키모터의 총 무게 변화량이 된다.

Table 1. Mass prediction with the time

시간 (sec)	점화기 (kg)	노즐 (kg)	케이스 (kg)	추진제 (kg)	슬래그 (kg)	키모터 (kg)
0.00	12.190	67.460	155.830	1578.87	0.000	1814.350
12.47	11.527	66.563	155.347	1188.67	0.000	1422.107
24.17	11.496	65.722	153.997	814.14	1.437	1046.792
36.49	11.463	64.836	151.994	482.06	3.367	713.720
57.70	11.404	63.260	149.030	0.00	6.800	230.494

키모터의 전체 무게 변화량과 추진제의 무게 변화량은 유사한 경향을 나타내고 있다. 그 이유는 추진제의 무게 변화량이 전체 무게 변화의 99.6%를 차지하기 때문인 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 논문에서는 키모터 구성품들과 슬래그의 비행시간에 따른 무게 변화를 예측하는 방법과 결과를 정리하였다.

이 자료의 예측 결과는 KSLV-I 2단의 비행 시간에 따른 무게 및 무게중심을 계산하는데 기초자료로 활용될 예정이다.

참 고 문 헌

1. 제8회 우주발사체기술 심포지움, "Case Study about Slag Generation and Effect in Solid Motor" 2007
2. R. M. Eber, "Slag Retention Predictions in Large Solid Propellant Rocket Motors", AIAA-91-2294
3. Sutton, G. P., "Rocket Propulsion Elements", 6th ed., John Wiley & Sons Inc., 1992