

技術論文

KSLV-I 상단 킥 모터 추력 축 정렬에 대한 연구

정동호*† · 이한주* · 오승협*

A Study on the Thrust Axis Alignment of Kick Motor for KSLV-I

Dong-Ho Jung*† · Han-ju Lee* · Seung-Hyub Oh*

ABSTRACT

The thrust axis alignment of the launch vehicle is very important because the misalignment causes the unstable attitude control and results in mission failure. Generally, optical methods such as digital theodolite and laser tracker and mechanical method such as turn table method are used to align the thrust axis. This article deals with the simple method using inclinometer based on the gravitational direction. The inclinometer indicates zero degree when that is located on the perpendicular plate to gravitational direction. This method needs two inclinometer, such as standard and alignment ones and uses the angle difference as the reference data to adjust the TVC actuator offset.

초 록

우주발사체의 추력 축 정렬이 제대로 안되면 발사체의 자세제어가 불안정해지고 심할 경우 임무 실패를 초래 할 수 있으므로 추력 축 정렬은 매우 중요하다. 일반적으로 추력 축 정렬은 데오돌라이트나 레이저 트래커와 같은 광학 방식을 사용하거나 턴테이블을 사용하는 기계식 방식을 사용한다. 본 연구에는 중력 방향과 관련된 경사도계를 이용하는 쉬운 방법을 다룬다. 경사도계는 지구 중력방향과 수직이 되면 0도를 가리킨다. 이 방법은 두 개의 경사도계가 필요한데, 하나는 기준이고 다른 하나는 정렬용이다. 두 경사도계의 각도차이는 TVC 구동기를 조정하는 참고치가 된다.

Key Words: Kick Motor(킥 모터), Thrust Axis Alignment(추력 축 정렬), Inclinometer(경사도계)

1. 서 론

발사체는 크게 탑재물과 제어 시스템, 구조체

와 추진기관으로 구성된다. 발사체가 지상에서 이륙하는 것은 추진기관의 연소에 의해 발생하는 추력 때문이다. 추진기관의 추진력을 잘 제어하여 미리 설정된 발사체의 비행궤도를 따라 비행하도록 하는 것은 제어 시스템의 역할이다. 추진기관의 역할이 안정된 추력을 발생해서 발사체가 비행 할 수 있도록 하는 것인 반면 제어

접수일 2010. 11. 29, 수정완료일 2011. 1. 16, 게재확정일 2011. 1. 22

* 한국항공우주연구원, 추진기관체제팀

† 교신저자, E-mail: neopa@kari.re.kr

시스템의 기능은 발사체가 원하는 궤도로 날아가도록 제어를 하는 것이다. 그러기 위해서는 이륙 전 추력 축이 발사체의 기축에 대해 정렬되어야 한다. 만약 초기 정렬이 제대로 되어있지 않고 발사체의 기축과 추력 축이 어긋나 있는 상태이고, 이 상태로 이륙이 된다면 발사 초기 자세제어가 안 되어 임무 실패를 경험하거나 초기 이륙에는 문제가 없을지라도 비행 중 제어 명령대로 발사체의 자세제어가 안 되어 과도한 자세제어 에너지 손실과 추력의 손실이 발생되어 임무 성공의 가능성을 낮출 수 있다. 또한 지상연소 시험에서는 초기 정렬이 제대로 안되면 어긋난 추력 축으로 인해 정확한 추력 계측이 안 될 수 있고, 심한 경우에는 지상연소시험이 위험한 상황에 처할 수 있다. 이렇게 시스템 차원에서는 정렬이 상당히 큰 비중을 차지하고 있기 때문에 정확한 정렬의 중요성 또한 크다 할 수 있다.

관련연구 동향으로는 2007년에 KSR-III의 엔체 엔진에 대한 추력 축 정렬과정[1]과 경사도계를 이용한 정렬 방법[2]이 소개되었고, 경사도계를 이용한 정렬 방안이 수립되었다[3]. KSLV-I 상단 KM의 지상연소 시험을 수행한 정렬 결과가 2008년도에 참고문헌 [4]에 소개되었으며, 나로호 1차 발사에 적용한 정렬 방식을 참고문헌 [5]에 소개하였다.

한발사체에 사용되는 추진기관은 그 종류에 따라 고체추진기관과 액체 추진기관으로 나누어 지는데 추진기관의 종류에 따라 정렬 방식이 다르지는 않겠지만, 여기서는 KSLV-I에 사용된 킥 모터의 추력 축 정렬방안 전반에 대해 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 지상연소시험 추력 축 정렬

2.1.1 기 축 정의

기축은 발사체의 중심축을 의미한다. 이는 구조체의 외형을 3차원 측정하거나 부분적인 측정 결과를 합하여 알 수 있다. 발사체의 경우 기축

은 각종 탱크와 탱크연결부의 전, 후 중심을 연결한 축이 될 것이다. 각각의 단 별로 제작오차가 다르기 때문에 기축이 명확하게 하나의 축으로 표현되지는 않고, 측정결과를 정리하여 평균값을 취하든 제일 앞부분과 제일 뒷부분의 축만을 기축으로 선정하든 고유한 특성을 고려하여 기축을 선정해야 한다. 하지만 킥 모터는 그 자체로서 구조체의 역할도 수행하고 추진기관으로서의 역할도 수행하면서 액체 추진기관처럼 탱크와 탱크연결부 등으로 나누어지지 않으므로 쉽게 기축을 정의 할 수 있다.

여기서 다루는 킥 모터의 정렬 방안에서는 기축을 다음과 같이 정의한다. 앞서 설명 했듯이 킥 모터는 특성 상 그 자체가 기축이 될 수 있는데, 특히 지상연소시험에서는 더욱 그렇다. 킥 모터의 기축은 3차원 측정을 통해서 알 수 있다.

Figure 1의 (a)는 발사체의 기축을 예로 표현한 것이고, (b)는 킥 모터의 기축을 표현한 것이다. 킥 모터의 경우 추진기관의 전, 후방 중심을 연결한 가상의 축이 킥 모터의 기축이 되는 것이다.

2.1.2 추력 축 정의

추력 축은 연소 시 발생하는 화염의 중심축을 의미한다. 화염의 중심축은 연소될 때가 아니면 알 수 없지만 기하학적으로 다음과 같이 정의

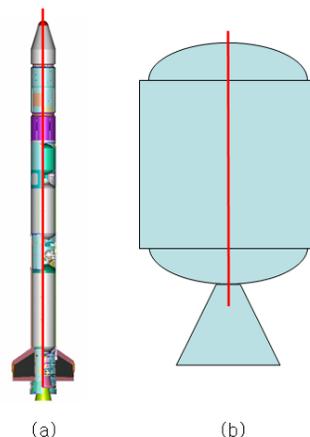


Fig. 1 Reference axis: (a) vehicle axis (b) kick motor system axis.

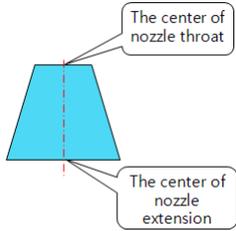


Fig. 2 Thrust axis of nozzle for kick motor system

했다. 킥 모터의 연소실에서 발생한 연소 가스는 Fig. 2와 같이 노즐 목을 지나 노즐 확대부를 지나게 되므로 노즐 목과 노즐 끝단의 중심을 연결한 가상의 축을 추력 축이라고 정한다.

2.1.3 지상연소시험 추력 축 정렬 개념

추력 축 정렬을 수행하기 위해서는 킥 모터와 노즐을 연결하는 TVC가 조립되어 정상작동 할 수 있는 상태이어야 한다.

경사도계는 지구 중력방향과 수직한 방향을 0°로 나타낸다. 이 절대값을 나타내는 경사도계를 이용하여 정렬하는 개념이 본 논문에서 소개하려는 정렬 방안인데, 이 방안을 적용하기 위해서는 경사도계를 장착할 수 있는 브라켓이 추진기관과 노즐에 장착되어 있어야 한다. 본 정렬 방법을 적용하기 위해서는 추진기관에 기준면을 설정해야 하는데, 이 기준면은 추진기관의 전방부로서 기축과 수직을 이루어야 한다. 추진기관은 3차원 측정을 통해서 기축과 기준면과의 각도 차이가 정확히 얼마나 나는지 미리 확인해야 한다. 기준면에 경사도계를 장착하기위한 브라켓도 3차원 측정을 통해서 추진기관의 기준면에 장착되는 면과 경사도계가 장착되는 면이 이루는 각도를 사전에 확인해야 한다. 지금까지 설명한 것처럼 기준면은 실린더의 중심과 그 중심과 수직을 이루는 전방부가 이루는 각도를 분명히 알 수 있다. 하지만 노즐은 고깔 모양을 하고 있기 때문에 추력 축과 경사도계 장착 브라켓이 조립되는 면의 관계를 명확히 하기가 어렵다. 따라서 노즐의 경우에는 미리 경사도계를 장착할 수 있는 브라켓을 만들어 노즐에 조립하고, 3차원 측정을 하여 경사도계 장착 면과 추력 축과

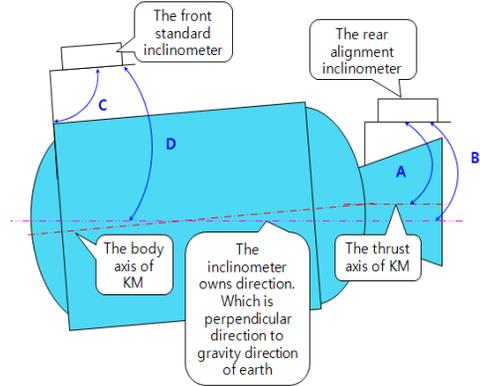


Fig. 3 The concept of thrust axis alignment using inclinometer

의 각도성분으로 나타내야 한다. 이렇게 확인된 각도성분을 가지고 정렬을 수행할 수 있는데, 그 개념은 Fig. 3과 같다.

Figure 3의 정렬 방안의 이해를 돕기 위해 A~D의 부호를 설명하면 다음과 같다.

- A : 경사도계 장착 면과 노즐의 추력 축이 이루는 각.
- B : 경사도계가 지구 중력방향에 대해 지시하는 값.
- C : 추진기관의 경사도계 장착 면과 추진기관의 기축에 수직한 기준면이 이루는 각.
- D : 기준면에 장착된 경사도계가 지구 중력방향에 대해 지시하는 값.

여기서 추진기관 전방에 장착되는 경사도계를 편의상 기준 경사도계라 하고, 노즐에 장착되는 경사도계는 정렬 경사도계라 한다. Fig. 3을 바탕으로 기준 경사도계가 지시하는 각도와 추진기관의 기축과의 관계를 알아보면 Fig. 4와 같이 표현 할 수 있다.

Figure 4는 기준 경사도계의 각도성분을 간략히 도시한 그림으로 이 그림으로부터 아래와 같은 식을 구할 수 있고, 이 식으로부터 얻어진 값은 Fig. 4의 알파이다.

$$\alpha = 90 - (C - D) \tag{1}$$

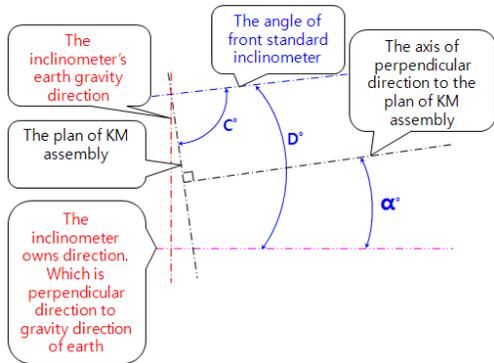


Fig. 4 The composition of angle of front standard inclinometer

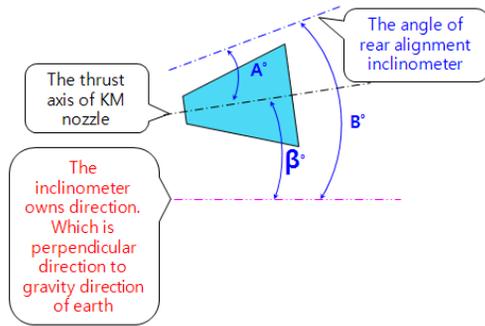


Fig. 5 The composition of angle of rear alignment inclinometer

지금까지의 결과로 추진기관의 기축과 중력방향에 수직한 경사도계의 기준 축과의 관계를 알 수 있었다. 이제 정렬 경사도계가 가리키는 값이 포함하고 있는 각도성분을 알아보면 Fig. 5와 같다.

Figure 5는 정렬 경사도계의 각도성분을 간략히 도시한 것으로 A와 B의 관계를 통해 베타를 구할 수 있는데 그 관계식은 아래와 같다.

$$\beta = B - A \quad (2)$$

이렇게 구해진 알파와 베타를 가지고 정렬을 수행하면 되는데, 앞서 언급 하였듯이 정렬의 개념이 추진기관의 기축에 노즐의 추력 축을 동일 축 선상에 놓이도록 하는 것이므로 기준 값인 알파는 그대로 두고, 정렬 값인 베타를 알파와 같은 각이 되도록 한다. 참고로 정렬에 사용하는

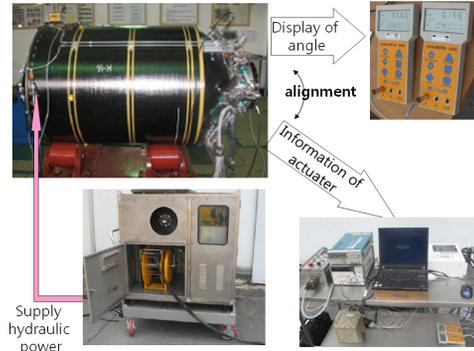


Fig. 6 The composition of thrust axis alignment

경사도계는 시계방향으로 경사도계가 회전하면 마이너스 값으로 표시되고 반시계방향으로 회전하면 플러스 값으로 표시되는 특성이 있다. 경사도계의 회전방향에 따른 +/- 각도 표시에 따라 위의 식들을 이용해 계산한 결과 값이 달라지므로 유의해야 한다.

일반적으로 발사체는 피치 축과 요 축에 대해 각각의 TVC 시스템을 적용한다. 지금까지 설명한 정렬은 한 축에 대해 설명한 것으로 두 축의 정렬을 위해서는 발사체나 추진기관을 90°회전하여 동일 한 방법으로 정렬을 수행하면 된다. Fig. 6은 지상연소시험에 적용된 추력 축 정렬의 구성도이다.

2.1.4 지상연소 시험 추력 축 정렬 결과

이렇게 정의된 정렬 개념은 노즐 구동장치를 적용하는 KSLV-I KM의 지상연소시험에서 총 10회의 시험 중 초기 2회를 제외한 8회에 적용하여 성공적으로 정렬을 수행하였다.

아래 Fig. 7은 실제 정렬을 수행하는 상황으로 전방에는 기준 경사도계가 장착되어 있고, 노즐 부에는 정렬 경사도계가 장착되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이 정렬 방식은 지금까지 수행한 여러 차례의 지상연소시험에서 정렬 요구조건 이상으로 정밀하게 정렬이 수행됨을 확인하였다. 정렬 수행 결과는 목표 정렬각에 추력 축을 얼마나 근접하게 정렬하였는가로 판단하게 되는데, 지상연소시험에서 수행한 총 8회의 추력 축 비정렬 평균은 피치가 0.006°, 요가 0.001°이다.

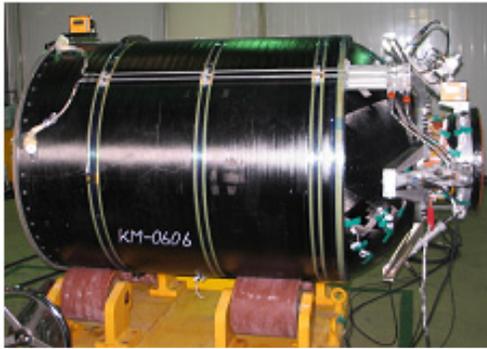


Fig. 7 Thrust axis alignment of KSLV-I KM before ground firing test

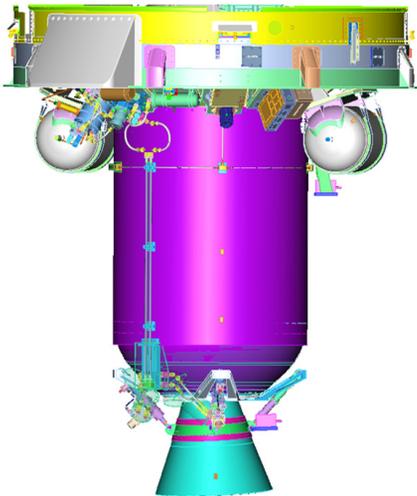


Fig. 8 Concept of thrust axis alignment of KSLV-I KM for flight model

2.2 비행용 추력 축 정렬

2.2.1 비행용 추력 축 정렬 개념

정렬의 기본 개념은 경사도계를 이용하여 기준면을 설정하고, 그 기준면에 대한 정렬대상의 각도를 확인 및 조절하는 것이다. Fig. 8과 같이 KM은 VEB(Vehicle Equipment Bay)에 조립된 상태로 기축이 수직으로 거치된다. 이 상태에서 KM전방 스킵터링에 기준 경사도계 브라켓과 경사도계를 장착하고, 노즐에는 카운터포텐티오미터 축 브라켓링에 정렬 경사도계 브라켓과 경사도계를 장착한다. 이때 두 경사도계의 각도 차이로 추력 축을 정렬 하는 것이다.

FM(Flight Model) KM의 추력 축 정렬은 GT(Ground Firing Test)용 KM의 추력 축 정렬과 달리 동시에 2방향(피치와 요)에 대한 정렬을 수행하게 된다. GT의 경우 KM의 거치가 추력 축이 수평한 상태로 거치되어 한 방향씩 정렬을 수행 할 수밖에 없었고, 이로 인해 한쪽의 정렬을 맞추고 다른 쪽의 정렬을 수행하면 이전에 정렬한 상태의 확인이 안 되는 문제가 있었다.

하지만 FM의 경우 추력 축 정렬 자세라고 할 수 있는 광학 정렬 측정 자세가 추력 축이 수직 한 상태에서 진행될 것이므로 동시에 2방향에 대한 정렬 수행이 가능해 졌다. 여기서 동시라는 의미는 KM의 자세변환 없이 정렬을 한 방향씩 수행하고, 다른 방향의 정렬시 이전 정렬 상태에 미치는 영향을 모니터 할 수 있고, 필요시 현장에서 보정 할 수 있음의 의미한다. 이런 과정은 2~3회 이상의 반복과정을 거치면서 2방향 모두 다른 방향의 정렬에 영향을 받지 않는 조건으로 정렬을 반복하여 수행 할 예정이다. 이를 위해서 FM의 정렬에는 경사도계가 4개가 필요하다 (GT=2개 사용). 경사도계 장착 방향은 90도와 180도 이고, 90도 방향은 0도에서 봤을 때 경사도계의 각도 표시부가 육안으로 확인 되어야 하고, 180도 방향은 90도에서 봤을 때 경사도계의 각도 표시부가 육안으로 확인 되어야 한다.

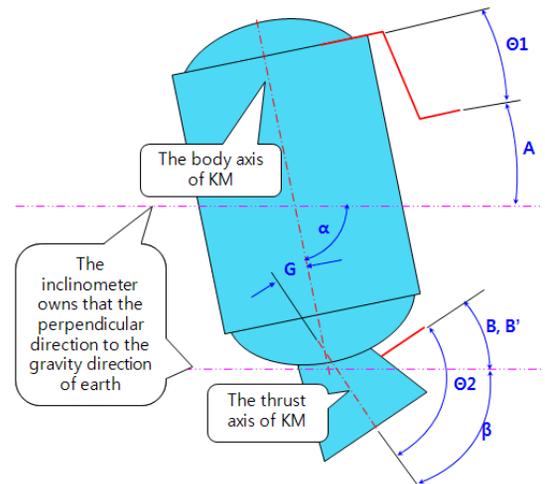


Fig. 9 A definition of symbols for KSLV-I KM flight model

Table 1. A definition of angle direction

구분	방향 기준	방향 정의
A, B(B')	경사도계 0도	CW : - , CCW : +
θ_1	전방스키트 링	
θ_2, β	추력 축	
α	기축	

- θ_1 : 기준 경사도계 브라켓의 각.
- A : 기준 경사도계의 지시 각.
- α : 경사도계의 0도와 기축이 이루는 각.
- θ_2 : 정렬 경사도계와 추력 축이 이루는 각.
- B : 정렬 경사도계의 지시 각
- B' : 정렬 목표 각
- β : 경사도계 0도와 추력 축이 이루는 각
- G : 기축과 추력 축의 각도 차(정렬 보정 전)

2.2.2 추력 축 정렬의 정의

Figure 9에서 α 와 β 가 동일한 각도가 되도록 β 각을 조정하는 것, 즉 $G=0$ 이 되도록 하는 것이 추력 축 정렬이다.

2.2.3 기준 각 α 정의

Figure 9에서 θ_1 은 3차원 측정을 통해서 미리 확인되는 값이다.

- A는 정렬 상황에서 경사도계가 나타내는 값이다.

$$\alpha = 90 - (A - \theta_1) \tag{3}$$

기준 각 α 는 Eq. 3으로 구한다.

2.2.4 정렬 각 β 정의

Figure 9에서 θ_2 는 3차원 측정을 통해 미리 확인 되는 값이다.

- B는 정렬 상황에서 경사도계가 나타내는 값이다.

$$\beta = \theta_2 - B \tag{4}$$

정렬 각 β 는 Eq. 4로 구한다.

2.2.5 정렬 목표 각 B' 정의

정렬 목표 각을 알기 위해서는 기축과 추력 축의 각도 차 즉 정렬 보정 각을 알아야 하는데, 정렬 보정 각 G는 Eq. 5로 구한다.

$$G = \alpha - \beta \tag{5}$$

정렬 보정 각으로부터 정렬 목표 각 B'는 Eq. 6을 통해 구한다.

$$B' = B - G \tag{6}$$

2.2.6 정렬 수행 결과

위의 계산 결과로 구해진 정렬 목표 각 B'와 노즐의 정렬 경사도계의 지시 값 B를 동일하도록 TVC 구동기를 조정하면 정렬이 수행 된다. 나로호 1차 발사에 적용된 추력 축 비정렬 값은 피치가 0.002°, 요가 -0.001°이다.

3. 결 론

경사도계를 이용한 추력 축 정렬 방법을 연구 하여 KSLV-I 상단 KM의 지상연소시험에 8회 적용하여 경사도계를 이용한 추력 축 정렬에 대한 경험을 쌓았고, 비행 모델에 적용하기 위한 근거를 마련하였다. 이 경험을 기반으로 하여 비행용 모델에 대한 정렬 방안을 연구하였으며 지상연소시험에 사용했던 방식을 수정하여 비행 모델에 대한 추력 축 정렬 방법을 개발 하였다. 경사도계를 이용한 추력 축 정렬을 통해서 KSLV-I KM의 지상연소 시험과 비행에 요구되는 정렬 오차범위 내로 정렬을 수행 할 수 있었다. 이번에 개발 된 방식은 추후 발사체의 추력 축 정렬관련 연구에 좋은 참고 자료가 될 것이다.

참 고 문 헌

1. 정동호, 김지훈, 이한주, 오승협, "발사체의

- 추력 축 정렬에 대한 연구,” 한국우주과학회보, 제16권 1호, 2007, p.197
2. 정동호, 김지훈, 이한주, 오승협, “경사도계를 이용한 킥 모터 시스템의 추력 축 정렬,” 한국우주과학회보, 제16권 1호, 2007년, pp.198
3. 정동호, 김지훈, 이한주, 오승협, “킥 모터 시스템의 추력 축 정렬 방안,” 제8회 우주발사체기술 심포지움, 2007, pp.70-73
4. 정동호, 김지훈, 이한주, 오승협, “고체 추진 모터의 추력 축 정렬,” 한국유체공학학술대회, 2008, pp.389-392
5. 정동호, 이한주, 김지훈, 오승협, “KSLV-I 비행1호기의 상단 KM과 VEB 조립체에 대한 추력 축 정렬,” 한국우주과학회보, 제18권 2호, 2009, p.65