

## 지상 연소 시험을 위한 킥 모터의 추력 축 정렬

정동호\*·김지훈\*\*·이한주\*\*\*·오승협\*\*\*

### The Thrust Axis Alignment of Kick Motor for Ground Firing Test

Dong-Ho Jung\*, Ji-Hoon Kim\*\*, Han-Ju Lee\*\*\* and Seung-Hyub OH\*\*\*\*

**Key Words** : Thrust Axis(추력 축), Thrust Axis Alignment(추력 축 정렬)

#### Abstract

The thrust axis alignment of the launch vehicle is very important because of 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 thrust axis alignment. This article deals with the simple method of thrust axis alignment of Kick Motor.

#### 1. 서론

발사체는 탑재물과 제어 시스템, 구조체와 추진기관 시스템으로 구성된다. 발사체가 지상에서 이륙하는 것은 추진기관의 연소에 의해 발생하는 추력 때문이다. 추진기관이 발생시키는 추진력을 잘 제어해서 미리 설정된 발사체의 비행궤도에 따라 비행하도록 하는 것은 제어 시스템의 역할이다. 추진기관의 역할은 안정된 추력을 발생해서 발사체가 비행할 수 있도록 하는 것인 반면 제어 시스템의 기능은 발사체가 원하는 궤도로 날아가도록 제어를 하는 것이다. 그러기 위해서는 이륙 전 추력 축이 발사체의 기축에 대해 정렬이 되어야 한다. 만약 초기 정렬이 제대로 되어있지 않고 발사체의 기축과 추력 축이 약간 어긋나 있는 상태이고, 이 상태로 이륙이 된다면 발사 초기 자세제어가 안 되어 임무 실패를 경험하거나 초기 이륙에는 문제가 없을지라도 비행 중 제어명령대로 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 지상연소시험의 위험한 상황에 처할 수 있다. 이렇게 시스템 차원에서는 정렬이 상당히 큰 비중을 차지하고 있기 때문에 정확한 정렬의 중요성 또한 크다 할 수 있다. 발사체에 사용되는 추진기관은 그 종류에 따라 고체추진기관과 액체 추진기관으로 나누어지는데 추진기관의 종류에 따라 정렬 방식이 다르지는 않겠지만, 여기서는 KSLV-I에 사용되는

킥 모터 시스템의 추력 축 정렬방안에 대해 소개하고자 한다. 추력 축은 연소 시 발생하는 화염의 중심축을 의미한다. 화염의 중심축은 연소될 때가 아니면 알 수 없지만 기하학적으로 다음과 같이 정의했다. 킥 모터 시스템의 연소실에서 발생된 연소 가스는 노즐 목을 지나 노즐 확대부를 지나게 되므로 노즐 목과 노즐 끝단의 중심을 연결한 가상의 축을 추력 축이라고 정한다.

#### 2. 본론

##### 2.1 기축 정의

기축은 발사체의 중심축을 의미한다. 이는 구조체의 외형을 3차원 측정하거나 부분적인 측정 결과를 합하여 알 수 있다. 발사체의 경우 기축은 각종 탱크와 탱크연결부의 전, 후 중심을 연결한 축이 될 것이다. 각각의 단 별로 제작오차가 각기 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 모터 시스템은 그 자체로서 구조체의 역할도 수행하고 추진기관으로서의 역할도 수행하면서 액체 추진기관처럼 탱크와 탱크연결부 등으로 나누어지지 않으므로 쉽게 기축을 정의 할 수 있다.

여기서 다루는 킥 모터 시스템의 정렬 방안에서는 기축을 다음과 같이 정의한다. 앞서 설명 했듯이 킥 모터 시스템은 특성 상 그 자체가 기축이 될 수 있는데, 특히 지상연소시험에서는 더욱 그렇다. 킥 모

\* 한국항공우주연구원, neopa@kari.re.kr

\*\* 한국항공우주연구원, jhk0622@kari.re.kr

\*\*\* 한국항공우주연구원, leehj@kari.re.kr

\*\*\*\* 한국항공우주연구원, shoh@kari.re.kr

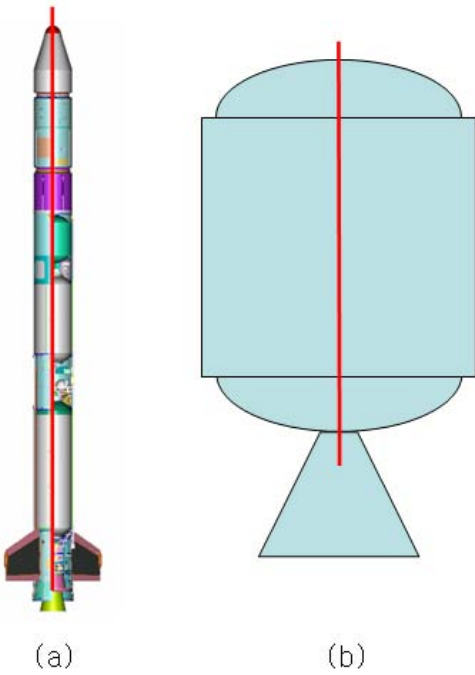


Fig. 1. Reference axis: (a) vehicle axis  
(b) kick motor system axis.

터 시스템의 기축은 3차원 측정을 통해서 알 수 있다.

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

## 2.2 추력 축 정의

추력 축은 연소 시 발생하는 화염의 중심축을 의미한다. 화염의 중심축은 연소될 때가 아니면 알 수 없지만 기하학적으로 다음과 같이 정의 했다. 킥 모터 시스템의 연소실에서 발생한 연소 가스는 노즐 목을 지나 노즐 확대부를 지나게 되므로 노즐 목과 노즐 끝단의 중심을 연결한 가상의 축을 추력 축이라고 정한다.

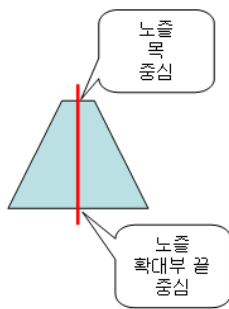


Fig. 2. Thrust axis of nozzle for kick motor system

## 2.3 추력 축 정렬

추력 축 정렬을 수행하기 위해서는 킥 모터 시스템과 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 지금 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 각도차이가 정확히 얼마나 나는지 미리 확인해야 한다. 기준면에 경사도계를 장착하기 위한 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 축과의 각도성분으로 나타내야 한다. 이렇게 확인된 각도성분을 가지고 정렬을 수행할 수 있는데, 그 개념은 Fig 3.과 같다.

Fig 3.의 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.

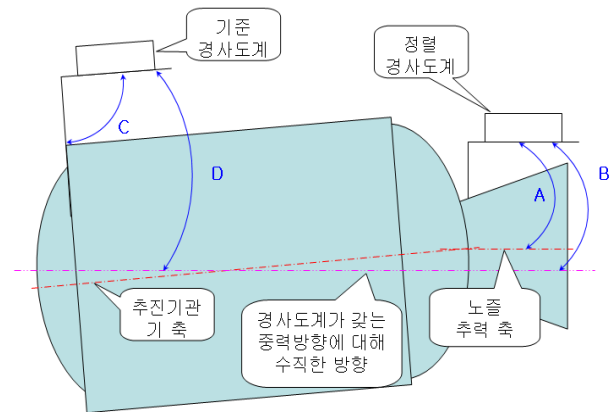


Fig. 3. The concept of thrust axis alignment using inclinometer

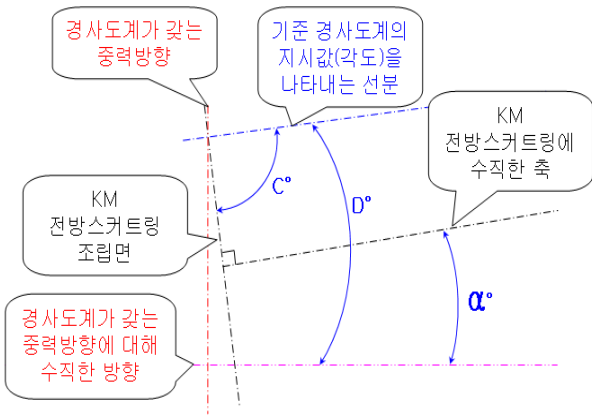


Fig. 4. The composition of angle of front standard inclinometer

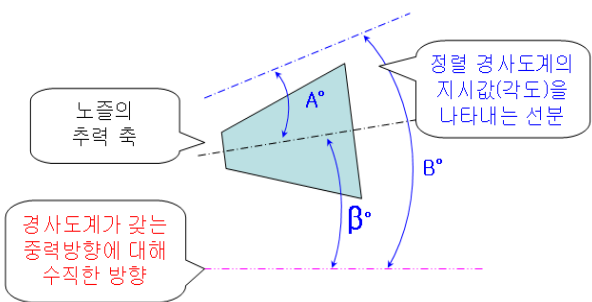


Fig. 5. The composition of angle of rear alignment inclinometer

$$\alpha = 90 - (C - D) \quad (1)$$

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

Fig 5.는 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 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 별도의 TVC구동을 수행한다. 지금까지 설명한 정렬은 한 축에 대해 설명한 것으로 두 축의 정렬을 위해서는 발사체나 추진기관을 90°회전하여 동일 한 방법으로 정렬을 수행하면 된다.

## 2.4 지상연소 시험에서의 추력 축 정렬

이렇게 정의된 정렬 개념은 노즐 구동장치를 적용하는 KSLV-I KM의 지상연소시험에서 1회를 제외하고 모두 적용하여 성공적으로 정렬을 수행하였다. 아래 Fig 7은 실제 정렬을 수행하는 상황으로 전방에는 기준 경사도계가 장착되어 있고, 노즐부에는 정렬 경사도계가 장착되어 있는 것을 확인 할 수 있다. 이 정렬 방식은 지금까지 수행한 여러 차례의 지상연소시험에서 정렬 요구조건 이상으로 정밀하게 정렬이 수행됨을 확인하였고 향후에는 실제 비행시험을 수행할 KM에도 동일한 방식의 정렬을 적용할 예정이다.

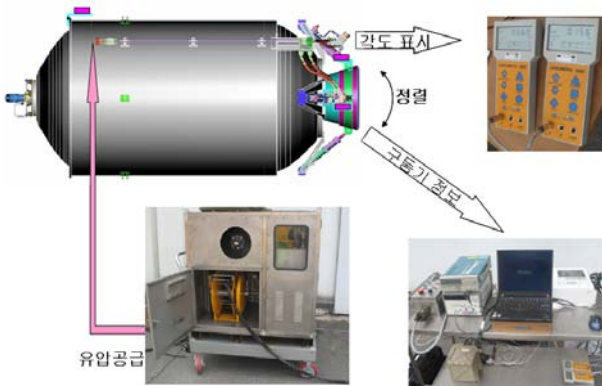


Fig. 6. The composition of thrust axis alignment

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

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



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

### 3. 결론

TVC를 적용하는 발사체에서 추력 축이 제대로 정렬되지 않으면 비행 중 발사체의 제어가 안 되어 불필요한 추가 에너지를 소모하게 되거나 과도하게 자세가 변환되어 심할 경우 공력하중의 증가로 발사체가 파괴되거나 비행안전 시스템에 의해 파괴될 수도 있다. 추력 축의 정렬은 잘 개발된 발사체를 성공시킬 수도, 실패시킬 수도 있는 중요한 일이다. 관련되어 지금까지는 복잡한 장비를 제작하거나 다루기 힘든 복잡한 고가의 측정 장비를 이용한 정렬

을 수행하였다. 하지만 지금 소개된 정렬 방법은 사전에 정렬 계획만 세우고, 기축과 추력 축을 잘 정의한 뒤 3차원 측정을 통해서 경사도계 장착 브라켓과 기축 또는 추력 축과의 관계를 파악하고, 실제 정렬 시는 경사도계만 장착하여 각도차이를 확인하고 정렬을 수행하는 방식이다. 현재 이 정렬 방식은 KSLV-I 킥 모터 시스템의 지상연소시험에 적용되고 있다.