

## KSLV-I 2단부 비행용 TVC 동특성 분석 및 선형모델 추정

선병찬\*, 박용규\*\*, 오충석\*\*\*, 노웅래\*\*\*\*

### Dynamic Analysis and Linear Model Estimation for Flight Model TVC System of KSLV-I Stage-II

Byung-Chan Sun\*, Yong-Kyu Park\*\*, Choong-Seak Oh\*\*\*, Woong-Rae Roh\*\*\*\*

#### Abstract

This paper concerns the dynamic property of TVC system in the upper stage of KSLV-I. The minimum bandwidth of TVC system is predicted by gathering and comparing the dynamic test data through whole development phases of KSLV-I. The linear models which approximate the dynamic data are also suggested. It is shown that the minimum bandwidth of KSLV-I TVC system is guaranteed over 6.0 Hz at one degree command. It is also shown that the linear model of KSLV-I TVC dynamics takes the form of the transfer function with an 8-th order denominator and a 2-nd order numerator. These results will play an important role in analyzing the flight stability and performance of KSLV-I.

#### 초 록

본 논문에서는 KSLV-I 2단부 TVC 시스템의 비행중 동특성 예측 결과를 제시하고자 한다. 개발단계별 TVC 동특성시험 데이터에 대한 비교 분석을 통해 비행용 TVC 시스템의 최소 작동 대역폭을 예측하고, 선형모델 추정 결과를 제시한다. TVC 동특성 데이터 비교 분석 결과 KSLV-I 2단부 TVC 시스템의 최소 작동 대역폭이 1도 명령 기준으로 6.0 Hz 이상 보장됨을 보인다. KSLV-I 2단부 TVC 동특성이 8차의 선형모델 형태로 근사됨을 또한 보인다. 본 논문의 결과는 궁극적으로 KSLV-I 최종 비행성능 및 자세안정성 분석 시에 활용되어 발사체의 안정적인 비행을 도모하는 데 있어서 큰 역할을 담당할 것으로 여겨진다.

키워드 : 소형위성발사체(KSLV-I), 킥모터(kick motor), 추력벡터제어(thrust vector control), 동특성 시험(dynamic test), 선형모델근사(linear model estimation)

---

접수일(2008년12월17일), 수정일(1차 : 2009년 9월 8일, 2차 : 2009년 10월 14일, 게재 확정일 : 2009년 11월 1일)

\* 임무설계팀/bcsun@kari.re.kr

\*\* 임무설계팀 /kyu2002@kari.re.kr

\*\*\* 임무설계팀/ocs@kari.re.kr

\*\*\*\* 임무설계팀/rwr@kari.re.kr

## 1. 서 론

국내 최초 소형위성발사체인 KSLV-I의 개발이 완료되어 발사를 앞두고 있다. KSLV-I의 상단부 자세제어시스템으로는 질소가스 추력기 시스템(RCS, Reaction Control System)과 추력벡터제어 시스템(TVC, Thrust Vector Control System)을 채용하고 있다. TVC 시스템은 2단부 킥모터 연소구간에서의 피치 및 요 자세제어를 목적으로 사용된다. 전기유압식 구동장치를 이용해서 플렉스셀 킥모터 노즐의 방향을 바꾸어줌으로써 추력벡터제어를 수행하게 된다. 일반적으로 구동장치의 동특성이 느리면 자세제어루프 상의 시간지연이 커지고 그만큼 안정성 여유가 감소하게 된다. 따라서, TVC 작동구간에서의 자세제어 안정성은 TVC 시스템의 동특성과 밀접한 관련을 맺을 수밖에 없다. 이에, KSLV-I 2단부 TVC 시스템의 동특성을 정확히 파악할 목적으로 개발 초기부터 다양한 시험과 분석을 수행해 왔다. 시제품 및 엔지니어링 모델(EM)을 이용한 공진모드 식별과 안정화 필터 설계, 인증모델(QM)을 이용한 구동 성능 인증시험, 비행모델(FM)을 이용한 동특성 확인시험, 지상연소시험(GT)에서의 연소중 동특성 검증시험 등이 수행되었다. 이 중에, 지상연소 시험에서의 TVC 구동시험은 안전사고 발생의 문제가 있기 때문에 가급적 작은 크기의 구동 명령을 적용해서 제한적으로 시험을 수행해야만 했으며 시험장의 환경조건 및 시험신호 인터페이스 조건에 따라 동특성 분석 결과가 조금씩 다르게 나타나기도 하였다.

본 논문에서는, KSLV-I 2단부 TVC 시스템에 대한 개발단계별 동특성 시험 데이터를 비교 분석함으로써 비행용 TVC 시스템의 최소 대역폭을 예측하고, TVC 시스템의 동특성을 선형모델 형태로 추정된 결과를 제시하고자 하였다. 비행용 TVC 동특성 선형모델은 발사체의 발사전 최종 비행안정성을 검증하고 시뮬레이션 분석을 수행하는데 있어서 반드시 필요한 부분이다.

## 2. KSLV-I TVC 동특성 시험 및 분석

KSLV-I 2단부 TVC 시스템에 대한 동특성시험은 크게 두가지로 나뉘어진다. 하나는 비활성 킥모터를 이용한 시험설비에서 수행하는 시험이고 다른 하나는 활성 킥모터를 이용해서 연소시험 상황에서 이루어지는 시험이다.

### 2.1 비활성 킥모터를 이용한 TVC 동특성 시험 및 분석

비활성 킥모터를 이용한 동특성시험에 필요한 장비를 그림으로 정리하면 다음과 같다.

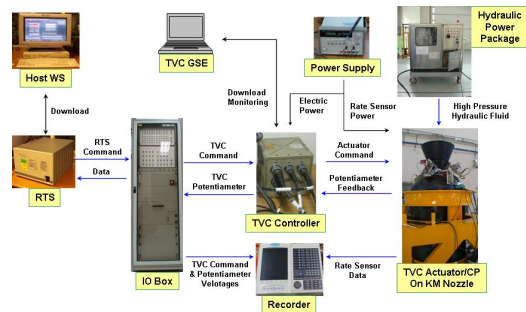


그림 1. FM TVC 동특성시험을 위한 시험장비 구성

시험스탠드에 거꾸로 장착된 킥모터 연소관 및 TVC 제어기를 비롯해서 TVC 유압을 공급하기 위한 유압팩키지, 전원공급을 위한 파워서플라이, TVC 구동명령을 생성하기 위한 실시간컴퓨터(RTS), 시험 데이터 저장을 위한 기록장치, 명령 및 데이터 인터페이스를 위한 신호중계기(IO-Box), TVC 제어기 상태점검을 위한 지상점 검장비(TVC GSE), 동특성시험용 실시간 프로그램 생성과 모니터링을 위한 호스트 워크스테이션(Host WS) 등으로 구성된다. 킥모터 연소관에는 플렉스셀 노즐이 장착된 상태이고 피치 및 요 TVC 구동기와 카운터 포텐서미터가 조립되어 있다. 동특성 시험에 사용되는 센서로는 구동기 내장형 포텐서미터, 카운터 포텐서미터, 및 각속도계가 있다. 포텐서미터 신호는 TVC 제어기로 궤환되어 구동기 자체 제어루프의 입력으로 사용되기도 한다. 각속도계는 킥모터 노즐에 직접 부

착되어 노즐의 김발링 운동 성분을 측정하게 된다. 동특성시험을 위한 구동명령은 정현파 신호 형태로 구성된다. 일정한 크기의 정현파 신호를 0.2~100 Hz 주파수 범위에서 순차적으로 보내주면서 노즐의 거동 특성을 살펴게 된다. 신호 생성주기 및 데이터 샘플링 주기는 1 msec 이다.

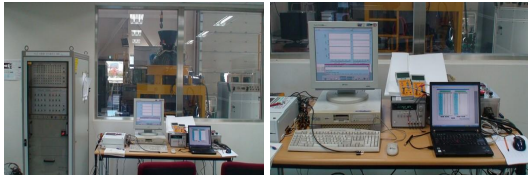


그림 2. KSLV-I TVC 동특성시험 진행 모습

비활성 키크모터 노즐에 TVC 구동기를 장착해서 수행한 동특성시험은 엔지니어링 모델(EM), 인증모델(QM), 연소시험모델(GT), 비행모델(FM) TVC 시스템 등에 대해 수행되었다. 이 중에 동일한 규격으로 제작된 QM, GT, FM 에 대한 시험결과를 비교함으로써 비행 중의 실제적인 TVC 동특성을 살펴보고자 하였는데, 그 결과는 다음 절에서 설명되어질 것이다.

## 2.2 연소시험 상황 TVC 동특성 시험 및 분석

연소시험 상황에서의 TVC 동특성시험은 연소 중의 안전 문제로 인해 별도의 시험설비에서만 수행할 수가 있는데, 보통 50 m 이상의 원거리에서 구동명령 생성 및 시험데이터 계측이 이루어진다. 일반적으로 시험장 조건 및 탑재 전장품 개발단계에 따라 구동명령 생성과 시험데이터 계측을 위한 인터페이스가 다르게 구현될 수가 있다. 탑재 전장품 개발이 완료되기 이전 단계에서는 실시간컴퓨터에서 원거리 케이블을 통해 구동명령을 생성하게 되며, 발사체 탑재컴퓨터 개발이 이루어지고 나면 가급적 탑재 인터페이스 환경을 모사할 수 있도록 구현된다.

한편, 개발 단계에서의 키크모터 연소시험은 키크모터 자체의 성능 검증이 우선적인 목적이 되는 바, 안전한 연소시험을 보장할 수 있는 범위 내

에서 TVC 구동시험을 제한적으로 계획해야 하는 문제가 존재한다. 이때 TVC 노즐의 동특성을 파악할 목적으로 가해지는 구동명령의 크기는 가급적 작은 값으로 제한할 수밖에 없으며 길지 않은 연소시간을 감안해서 주파수 범위 또한 예상되는 대역폭을 포함할 수 있는 정도로만 설정하게 된다.

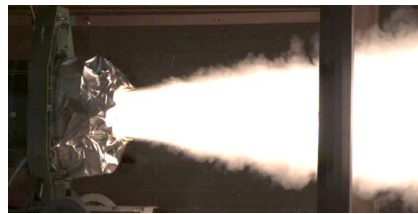


그림 3. 연소시험 상황 TVC 동특성시험

KSLV-I 2단부 키크모터 연소시험에 적용된 TVC 동특성 시험신호를 그림으로 나타내면 다음과 같다. 최대 노즐각이 1도 이내이고 신호 주파수는 0.5~20 Hz 범위를 가지며 주파수가 증가함에 따라 신호의 크기가 0.1도까지 감소하는 형태를 가지도록 설정되었다. 신호의 크기가 크지 않기 때문에 신호의 크기에 따른 TVC 비선형성을 살펴보기는 쉽지 않았지만 비활성 키크모터에 대한 TVC 동특성시험 결과와의 비교를 통해 연소시험 중의 정상 작동 유무를 상대적으로 확인할 수 있을 것으로 판단하였다.

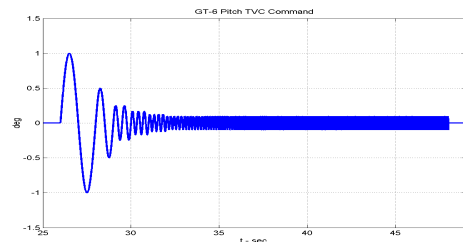


그림 4. 연소시험 상황 TVC 동특성시험용 구동명령

한편, 연소시험에 투입된 플렉스셀 노즐이나 TVC 구동기들 간의 특성 차이에 의해 TVC 시스템의 동특성이 달라질 수도 있으므로 수차례의

연소시험에 동일한 구동명령을 연속적으로 적용해서 시험결과를 비교하기도 하였다.

### 2.3 주파수역 TVC 동특성 분석 방법

정현파 신호를 이용해서 TVC 동특성시험을 수행하는 경우 주파수별 이득과 위상 데이터를 시간 영역에서 바로 계산할 수가 있다. 먼저, TVC 구동명령 및 명령의 각속도 성분을

$$u = A \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\dot{u} = A\omega \cos(\omega t) \quad (2)$$

라고 두고 측정된 노즐각 데이터를

$$y = B \sin(\omega t + \phi) \quad (3)$$

로 가정하면,

$$y = B(\sin(\omega t)\cos(\phi) + \cos(\omega t)\sin(\phi)) \\ = K_1 u + K_2 \dot{u} \quad (4)$$

$$K_1 = \frac{B}{A} \cos(\phi), \quad K_2 = \frac{B}{A\omega} \sin(\phi) \quad (5)$$

와 같이 나타낼 수가 있다. 여기서 시스템의 이득은  $K = \frac{B}{A}$ 이고 위상은  $\phi$ 가 된다. 따라서, 위 식으로부터  $K_1$ 과  $K_2$ 를 추정하게 되면 이득과 위상은

$$K = \sqrt{K_1^2 + K_2^2 \omega^2}, \quad \phi = \tan^{-1}\left(\frac{K_2 \omega}{K_1}\right) \quad (6)$$

와 같이 계산할 수가 있다.  $K_1$ 과  $K_2$  추정에는 최소자승기법 등을 적용할 수가 있다.

한편, 각속도계 측정 데이터의 경우에는 측정 신호가

$$y_{rate} = C \omega \cos(\omega t + \phi) \quad (7)$$

와 같은 형태가 되므로 계산 방식이 다음과 같이 다소 달라지게 된다.

$$y_{rate} = C\omega(\cos(\omega t)\cos(\phi) - \sin(\omega t)\sin(\phi)) \\ = -K_3 u + K_4 \dot{u} \quad (8)$$

$$K_3 = \frac{C\omega}{A} \sin(\phi), \quad K_4 = \frac{C}{A} \cos(\phi) \quad (9)$$

이때 이득과 위상은 각속도계 데이터로부터

$$K = \frac{C}{A} = \sqrt{\left(\frac{K_3}{\omega}\right)^2 + K_4^2}, \quad \phi = \tan^{-1}\left(\frac{K_3}{K_4 \omega}\right) \quad (10)$$

와 같이  $K_3$ 와  $K_4$ 에 대한 추정을 통해 구할 수 있게 된다.

## 3. KSLV-I 2단부 TVC 시스템 주파수역 동특성 분석 결과

### 3.1 FM TVC 시스템의 주파수역 동특성

먼저, FM TVC 구동기 및 포텐서미터를 적용한 경우의 TVC 동특성 시험 결과를 정리하면 다음 그림과 같다. 위쪽그림은 주파수별 이득특성을 나타내고 아래쪽 그림은 위상 특성을 나타낸다.

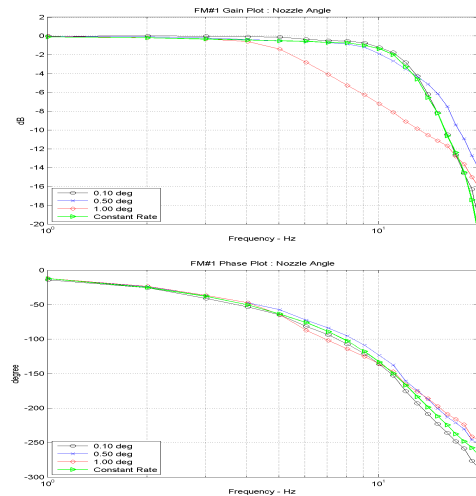


그림 5. FM TVC 시스템의 주파수역 동특성

포텐서미터 데이터로부터 분석한 결과와 각속도계 데이터로부터 분석한 결과가 유사한 형태로

얻어졌으며, 여기서는 대표적인 결과로서 포텐서미터 데이터 분석 결과를 정리하였다. 주파수역 동특성을 살펴보면, 10 Hz 이상의 고주파수 대역에서 시스템의 이득이 급격히 감소함으로써 잡음 등에 의한 악영향이 거의 없고 예기치 않은 진동성분에 의한 공진 현상 또한 발생하지 않는 형태임을 확인할 수가 있다. 이러한 특징은 TVC 제어기에 포함되어 있는 디지털 서보필터의 설계가 제대로 이루어졌고 정상적으로 작동하고 있음을 보여주는 결과이다.

TVC 구동명령의 크기가 커질수록 시스템의 대역폭이 낮아지면서 동특성이 느려지는 비선형 특성 또한 쉽게 확인할 수가 있는데, 비선형 특성은 4~20 Hz 대역에서 두드러지게 나타났다. 연소시험에서의 동특성분석 결과도 함께 그려 보았는데 (그림에서 'Constant Rate'로 표시된 부분) 0.1도 크기의 정현파 시험 결과와 유사하였다.

### 3.2 모델별 TVC 동특성 비교

FM TVC 동특성을 EM, QM, 및 GT TVC 동특성과 비교해서 그림으로 그려보면 다음과 같다. 구동명령의 크기가 0.1도, 0.5도, 1.0도인 경우로 구분해서 나타내었다.

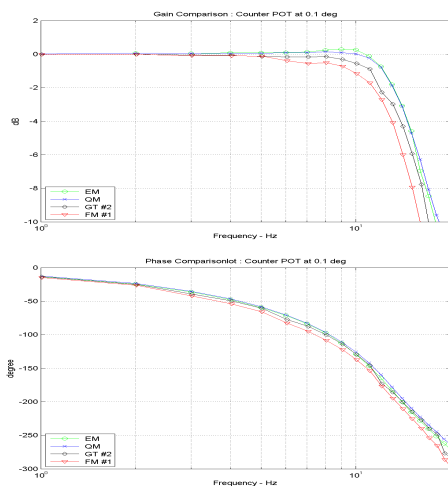


그림 6. 모델별 TVC 동특성 비교 : 0.1도 기준

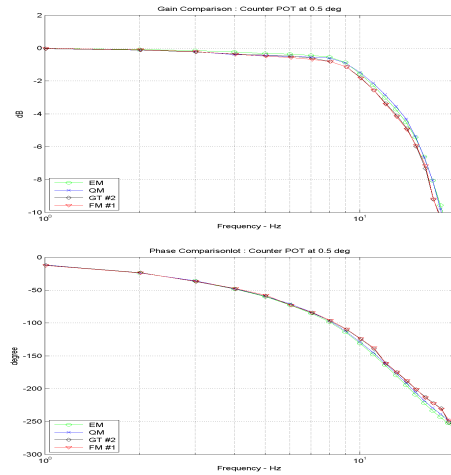


그림 7. 모델별 TVC 동특성 비교 : 0.5도 기준

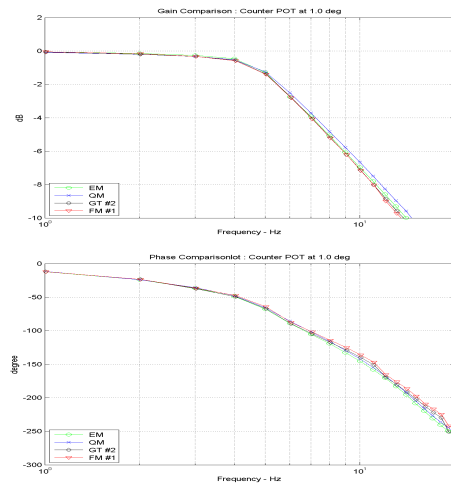


그림 8. 모델별 TVC 동특성 비교 : 1.0도 기준

노즐각이 0.5도, 1.0도인 경우에는 모델별 동특성 차이가 거의 발생하지 않지만, 노즐각이 작으면 (0.1도인 경우) 모델별 동특성 차이가 많이 발생함을 볼 수가 있다. EM, QM에 비해 GT의 TVC 동특성이 다소 느리고 FM TVC 동특성이 상대적으로 가장 느린 것으로 나타났다. 동특성이 느릴수록 발사체의 자세제어 안정성에 미치는 영향이 크므로, FM TVC 동특성 데이터로부터 구한 모델을 안정성 분석에 적용해서 문제가 없다고 판단되면 다른 시험 모델은 별도로 적용하지 않아도 될 것이다.

### 3.3 TVC 시스템의 최소 대역폭 분석

모델별 TVC 동특성 비교를 통해 시스템의 최소 작동대역폭을 분석할 수가 있는데, 이는 시스템이 운용 가능한 주파수 범위를 대략적으로 살펴볼 수 있는 수치를 제공한다. TVC 시스템의 최소 작동대역폭은 이득이 -3dB인 주파수 및 위상이 -90도인 주파수 분석을 통해 살펴볼 수가 있으며 그 결과를 정리하면 다음 표와 같다. FM TVC 이득 동특성의 경우, QM에 비해 0.1도 명령에서 약 1.55 Hz, 0.5도 명령에서 약 0.5 Hz, 1.0도 명령에서 약 0.2 Hz 정도 대역폭이 낮게 나타났고, 위상 동특성의 경우에는 모든 명령에서 QM 과 유사한 수준인 것으로 나타났다. 동특성이 가장 느린 경우를 기준으로 최소 작동 대역폭을 살펴보면 약 6.0 Hz가 됨을 알 수 있다. 이것은 비행 중의 TVC 구동명령이 6.0 Hz의 속도로 빠르게 변하더라도 성능 감소나 시간지연이 거의 없이 TVC 시스템이 정상적으로 작동함을 의미한다.

표 1. 모델별 TVC 최소 작동 대역폭 비교 (1)

구 분		이득 -3dB 주파수 기준	위상 -90도 주파수 기준
0.1도 명령	EM	13.841	7.524
	QM	13.797	7.580
	GT	13.055	7.303
	FM	12.243	6.733
0.5도 명령	EM	11.890	7.390
	QM	12.034	7.523
	GT	11.559	7.493
	FM	11.505	7.583
1.0도 명령	EM	6.214	6.067
	QM	6.413	6.286
	GT	6.212	6.062
	FM	6.204	6.225

### 3.4 연소시험 상황에서의 TVC 동특성

연소시험 상황에서 구한 TVC 동특성 데이터를 시험 호기별로 비교해서 TVC 동특성의 변동 특성을 살펴보았다. 비활성 킥모터 노즐로부터 구한 시험 결과와의 상대적인 비교를 위해 FM

TVC 에 동일한 신호를 적용한 결과를 함께 나타내었고, 시험환경에 따른 영향성 검토를 목적으로 GT 9호기 TVC에 대해서 FM TVC 와 동일한 시험환경에서 수행한 시험 결과 또한 함께 정리하였다. TVC 동특성 분석용 신호는 GT 5호기 부터 9호기까지 적용한 바 있다.

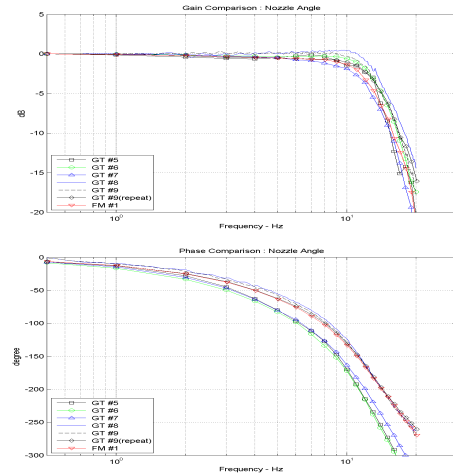


그림 9. TVC 동특성 비교 : GT 신호기준

그림에 의하면, 똑같은 TVC 시스템임에도 불구하고 연소시험 상황에서 측정된 결과(그림에서 'GT #9')와 별도의 시험설비에서 측정한 결과(그림에서 'GT#9(repeat)')가 달라졌음을 볼 수가 있으며, 연소시험 상황에 따라서도 그 특성이 조금씩 차이나는 것을 확인할 수가 있다. 이득 동특성보다는 상대적으로 위상 동특성에 있어서 그 차이가 크게 발생한 것으로 보이는데, 이는 구동 명령 및 시험데이터 계측을 위한 인터페이스 환경의 차이에서 비롯된 것으로 판단되었다.

특히, 고온다습한 기후의 한여름에 수행한 GT 8호기 및 9호기 시험에서의 TVC 동특성이 상대적으로 가장 높은 작동 대역폭을 가지는 것으로 나타났는데, 동일한 설비에서 이루어진 이전까지의 시험 결과와도 다른 특성을 보이는 것으로 봐서 고온 및 습도에 의한 구동유압 과다공급 현상이 발생한 것으로 판단되었다.

연소시험장에서의 계측 데이터 시작시기 문제 및 데이터 저장 주기 제한 조건 (GT 5~7호기 시

험에서 100 Hz로 계측, GT 8호기 시험에서는 1 kHz로 계측)에 의해 최대 10 msec의 시간지연이 존재할 수 있음을 알 수 있었고 이에 GT 5~7호기 시험결과에 10 msec의 시간지연을 보상해서 위상선도를 다시 그려보았는데 결과는 다음과 같다. GT 5~9호기의 위상 동특성이 상당히 유사한 형태가 되었음을 확인할 수가 있으며, 이는 GT 호기별 인터페이스 시간지연이 어느 정도 존재했었음을 간접적으로 증명하는 대목이라 하겠다.

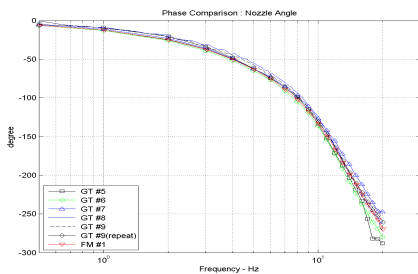


그림10. TVC 위상 동특성 비교 : GT 시간지연 보상후

시간지연 보상 후의 동특성 데이터를 기준으로 연소시험 상황에서의 TVC 최소 작동 대역폭을 분석해 보았는데 결과는 다음 표와 같다. 전반적인 결과가 비활성 키토퍼 동특성시험에서의 0.1도 명령 기준 결과와 유사함을 확인할 수가 있으며, 그 변동 범위가 이득 대역폭은 11.9~13.7 Hz, 위상 대역폭은 6.9~7.7 Hz 로서 비활성 키토퍼 시험에서 예측한 수준의 성능이 나왔음을 알 수가 있다. 결과적으로, 실제 비행 중에도 이와 유사한 수준의 TVC 구동 성능을 보일 것으로 판단된다.

표 2. 모델별 TVC 최소 작동 대역폭 비교 (2)

구 분	이득 -3dB 주파수 기준	위상 -90도 주파수 기준
GT 5호기	13.016	7.304
GT 6호기	12.937	6.924
GT 7호기	11.387	7.386
GT 8호기	13.740	7.705
GT 9호기	12.910	7.485
GT 9반복	12.746	7.299
FM	11.874	7.111

#### 4. KSLV-I 2단부 TVC 동특성 선형모델 추정

비행모델 TVC 동특성 데이터를 기준으로 선형모델을 추정하였다. TVC 노즐의 최대 작동대역폭이 10~15 Hz 로 예상되는 바, 최소 20 Hz 대역까지의 동특성에 대해 가능한 한 정확히 근사시키는 선형모델을 찾는 것을 목표로 진행하였다. 0~20 Hz 주파수대역 동특성을 정확히 근사하면서도 가급적 80~100 Hz 까지의 고주파수 대역까지 포함되도록 해서 추후 안정성 분석 시에 벤딩 등의 다른 운동 모드와의 영향성을 함께 살펴볼 수 있도록 하였다.

모델의 적용 편의성 측면을 고려해서 2차식부터 8차식까지 순차적으로 차수를 증가시키면서 정확한 근사가 가능한 모델을 찾고자 하였다. 각 차수별 TVC 선형모델의 형태를 정리하면 다음과 같다.

- 2차 TVC 선형모델

$$G_{act}(s) = \frac{\omega_1^2}{(s^2 + 2\zeta_1\omega_1 + \omega_1^2)}$$

- 3차 TVC 선형모델

$$G_{act}(s) = \frac{\omega_1^2}{(s^2 + 2\zeta_1\omega_1 + \omega_1^2)} \frac{\omega_2}{(s + \omega_2)}$$

- 4차 TVC 선형모델

$$G_{act}(s) = \frac{\omega_1^2}{(s^2 + 2\zeta_1\omega_1 + \omega_1^2)} \frac{\omega_2^2}{(s^2 + 2\zeta_2\omega_2 + \omega_2^2)}$$

- 6차 TVC 선형모델

$$G_{act}(s) = \frac{\omega_1^2}{(s^2 + 2\zeta_1\omega_1 + \omega_1^2)} \frac{\omega_2^2}{(s^2 + 2\zeta_2\omega_2 + \omega_2^2)} \times \frac{\omega_3^2}{(s^2 + 2\zeta_3\omega_3 + \omega_3^2)}$$

- 8차 TVC 선형모델

$$G_{act}(s) = \frac{\omega_1^2}{(s^2 + 2\zeta_1\omega_1 + \omega_1^2)} \frac{\omega_2^2}{(s^2 + 2\zeta_2\omega_2 + \omega_2^2)} \times \frac{\omega_3^2}{(s^2 + 2\zeta_3\omega_3 + \omega_3^2)} \frac{\omega_4^2 (s^2 + 2\zeta_5\omega_5 + \omega_5^2)}{\omega_5^2 (s^2 + 2\zeta_4\omega_4 + \omega_4^2)}$$



적용 결과, 2차식 및 3차식으로는 이득과 위상 특성을 동시에 정확히 근사시키는 모델을 찾기가 쉽지 않은 것으로 나타났고, 4차의 선형모델로는 0~20 Hz 주파수대역 동특성에 대해서 비교적 정확히 근사시킬 수가 있었으며, 6차의 선형모델로는 0~40 Hz 대역의 근사모델을 찾을 수가 있었다. 80 Hz 대역까지 넓힐 경우에는 8차의 선형 모델 형태로 근사모델을 구할 수 있었다. 대표적인 결과로서 8차의 선형모델 근사 결과를 그림 및 표로 정리하면 다음과 같다. 이득 동특성 및 위상 동특성을 독립적으로 정확히 근사시키는 모델을 얻기 위해서 이득 근사 모델과 위상 근사 모델을 따로 구한 결과이다. 이득 근사 모델과 위상 근사 모델을 별도로 구한 것은, 시스템 이득의 크기에 의한 영향성 분석에는 이득 근사 모델을 적용하고 시간지연 등에 의한 영향성 분석에는 위상 근사 모델을 적용함으로써 보다 정확한 분석이 가능하기 때문이다. 추정 결과에 의하면, 이득이나 위상 어느 쪽을 기준으로 근사하더라도 다른 쪽의 오차가 크게 발생하지 않음을 확인할 수가 있는데, 이로부터 추정모델이 적절한 형태로 구성되었음을 확인할 수 있다.

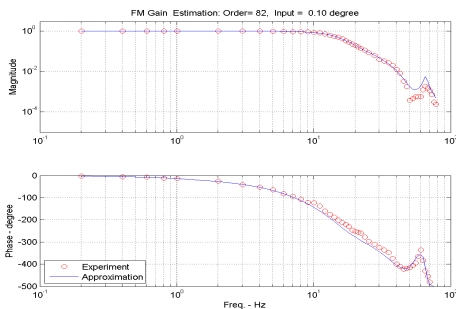


그림 11. FM TVC 8차 선형모델 추정 : 0.1도 이득근사

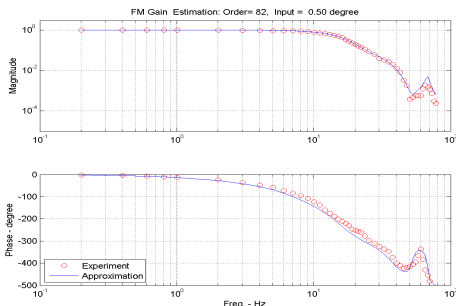


그림 12. FM TVC 8차 선형모델 추정 : 0.5도 이득근사

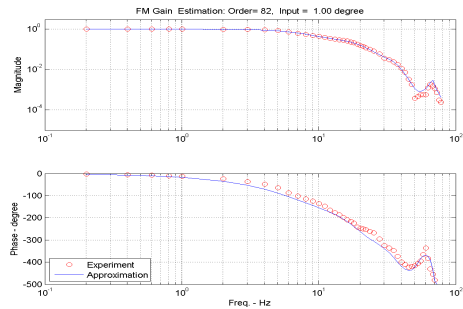


그림 13. FM TVC 8차 선형모델 추정 : 1.0도 이득근사

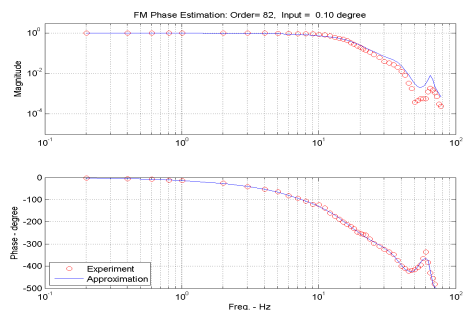


그림 14. FM TVC 8차 선형모델 추정 : 0.1도 위상근사

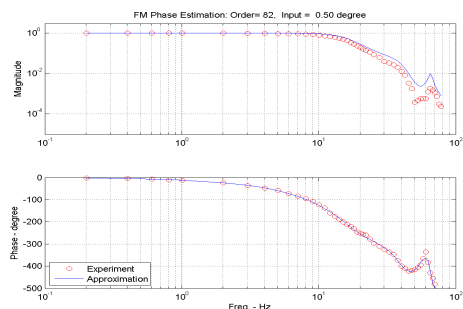


그림 15. FM TVC 8차 선형모델 추정 : 0.5도 위상근사

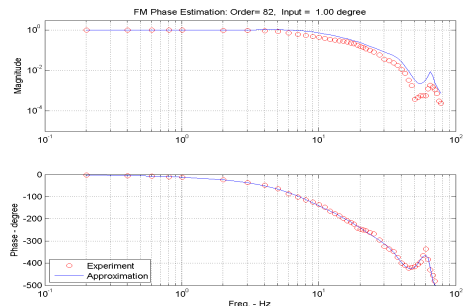


그림 16. FM TVC 8차 선형모델 추정 : 1.0도 위상근사



표 3. FM TVC 시스템 8차 선형모델 추정결과

구분 신호 크기	이득 근사 모델			위상 근사 모델		
	0.1도	0.5도	1도	0.1도	0.5도	1도
$\omega_1$ (Hz)	10.617	9.1337	6.1490	10.099	12.331	8.4242
$\zeta_1$	0.80713	0.78166	0.76453	0.87898	0.84124	0.64137
$\omega_2$ (Hz)	14.452	15.492	19.196	16.821	15.293	21.048
$\zeta_2$	0.44043	0.38256	0.34240	0.41815	0.43805	0.49009
$\omega_3$ (Hz)	37.471	38.143	37.408	39.099	38.660	38.609
$\zeta_3$	0.28959	0.21307	0.18224	0.17490	0.17490	0.17088
$\omega_4$ (Hz)	65.783	68.026	67.947	65.783	65.702	65.807
$\zeta_4$	0.026997	0.029019	0.03400	0.026997	0.026306	0.027096
$\omega_5$ (Hz)	53.792	52.277	52.814	53.792	54.033	53.758
$\zeta_5$	0.096984	0.051185	0.097907	0.096984	0.097670	0.098494

근사기법으로는, 가급적 저주파수 대역에서의 동특성을 정확히 근사시킬 목적으로 주파수가중 최소자승기법을 적용하였고 모든 주파수에서의 이득 또는 위상 근사 오차의 합을 영으로 만들기 위한 방향으로 근사모델의 파라미터를 연속적으로 갱신시키는 알고리즘을 사용하였다.

한편, 8차의 TVC 선형모델은 KSR-III 로켓의 1단부 TVC 선형모델의 경우와 동일한 형태임을 알 수 있는데, 이로부터 액체엔진의 힌지 노즐용 TVC 시스템과 고체모터의 플렉스셀 노즐용 TVC 시스템이 서로 크게 다르지 않고 오히려 유사한 특성을 가지는 것으로 보고 개발을 진행해도 무방할 것으로 여겨지기도 한다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 KSLV-I 2단부 TVC 시스템에 대한 개발단계별 동특성 시험데이터 비교 분석을 통해 TVC 최소 작동 대역폭 예측 결과와 TVC 동특성 선형모델 추정 결과를 제시하였다.

개발단계별 TVC 동특성 시험데이터에 대한 비교 분석 결과 KSLV-I 2단부 TVC 시스템의 최소 작동 대역폭은 6.0 Hz 이상 보장되는 것으로 나타났다. 연소시험 상황에서 분석된 TVC 동특성이 비활성 키크모터 시험에서 예측된 성능 범위 내에 존재해서 실제 비행 중에도 유사한 수준의

TVC 구동 성능을 보일 것으로 판단되었다.

0~80 Hz 대역의 비행모델 TVC 동특성을 근사시키기 위한 선형모델로서 8차의 이득 근사 모델과 위상 근사 모델을 각각 제시하였다. 본 논문에서 제시한 TVC 선형모델은 궁극적으로 KSLV-I 최종 비행성능 및 자세안정성 분석 시에 활용되어 발사체의 안정적인 비행을 도모하는데 있어서 큰 역할을 담당할 것으로 여겨진다.

## 참 고 문 헌

1. 선병찬, 박용규, "KSLV-I 실물형 키크모터조합체 TVC 구동특성시험 및 분석," 항공우주기술 제6권, 제1호, 2007년 7월, pp.146~156.
2. 선병찬, 노용래, 최형돈, "로켓엔진 연소시험 상황에서의 TVC 구동장치 동특성시험," 2005 한국항공우주학회 추계학술발표회, 2005년 11월, pp.844~847.
3. 선병찬, 박용규, 노용래, 박정주, "플렉스셀 노즐 TVC 구동특성시험 및 분석기법," 2006 한국항공우주학회 추계학술발표회, 2005년 11월, pp.643~646.
4. 민병주, 박문수, 이희중, 선병찬, 최형돈, "고체모터 가동노즐 구동장치시스템," 한국항공우주학회지, 제32권, 제5호, 2004년 6월, pp.122~128.
5. 선병찬, 박용규, 최형돈, "KSR-III 김발엔진 구동장치 종합선형모델 연구," 2002 한국항공우주학회 추계학술발표회, 2002년 11월, pp.1208~1211.
6. J.S.Bendat and A.G.Piersol, *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, John Wiley & Sons, 1986.